



COMPORTAMENTO FÍSICO E MECÂNICO DE BLOCOS DE GRANITO SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS

Luiz Felipe Pires Fontes

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Maio 2021



COMPORTAMENTO FÍSICO E MECÂNICO DE BLOCOS DE GRANITO SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS

Luiz Felipe Pires Fontes

Dissertação apresentada à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

Para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia da Construção

No âmbito da Dupla Diplomação com a

Universidade FUMEC

Orientado por:

Professora Doutora Débora Macanjo Ferreira (IPB)

Professora Doutora Graça Vasconcelos (UMINHO)

Professora Doutora Edna Alves Oliveira (FUMEC)

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus avós Antônio e Ana Lúcia que sempre me proporcionaram oportunidades acadêmicas maravilhosas, mesmos em momentos difíceis como os vividos hoje, só tenho a agradecer por todo seu amor e carinho.

Aos meus pais Simone e Luiz Carlos pelo amor e apoio incondicional em todas minhas decisões que tomei e por sempre estarem a postos para me ajudar em tudo que precisar.

Às minhas orientadoras Professora Doutora Débora Macanjo Ferreira, Professora Doutora Graça Vasconcelos e Professora Doutora Edna Alves Oliveira pela mentoria e conhecimento compartilhado durante o desenvolvimento da tese.

Aos meus amigos de longa data pelo incentivo ao longo da graduação e camaradagem.

Resumo

O presente trabalho aborda a história das construções vernáculas, tendo como objetivo estudar o comportamento físico e mecânico de alvenarias de pedra submetidas a altas temperaturas. Para tal, foram utilizados blocos de granito de três diferentes regiões de Portugal, Ponte de Lima, Mondim de Basto e de Povóia de Lanhoso. Os blocos foram cortados em cubos com arestas de 7 cm e caracterizados quanto à absorção de água por capilaridade, pressão atmosférica, massa volúmica, porosidade aberta e resistência à compressão. Foram utilizadas as normas europeias EN 1925:1999 (Métodos de ensaio para pedra natural determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade), EN 1926:2006 (Determinação da resistência à compressão), EN 1936:2006 (Determinação das massas volúmicas real e aparentes das porosidades total e aberta) e EN 13755:2008 (Determinação da Absorção de água por pressão atmosférica). O comportamento dos corpos de prova de granito a altas temperaturas foi avaliado para três patamares de exposição (20 °C, 400 °C e 800 °C) e dois modos de resfriamento: um de forma brusca, por meio de adição de água temperatura ambiente (20°C) e outro de forma natural. Foi possível avaliar que os granitos, expostos a um aumento de temperatura e choque térmico, apresentaram uma redução no módulo de deformação, além da redução da resistência à compressão. Foi observada uma relação entre as porosidades e as resistências dos granitos, o granito Póvoa de Lanhoso Azul, com menor porosidade aberta (0,61%) obteve a maior tensão de ruptura 152,35 MPa. Já o granito Mondim Basto Amarelo que obteve a maior porosidade aberta (5,47 %) rompeu com 30,5 MPa.

Palavras-chave: Alvenaria de pedra; granito, resfriamento brusco; choque térmico.

Abstract

The present work studied the history of vernacular constructions, and the main goal is the physical and mechanical behaviour of stone masonry exposed to high temperatures. For this purpose, granite blocks from three different regions of Portugal were used from Ponte de Lima, Mondim de Basto and Povóia de Lanhoso. The blocks were cut into cubes with 7cm x 7cm x 7cm edges and characterized by their water absorption by capillarity, atmospheric pressure, volume, open porosity, and compressive strength. The European standards used were EN 1925 (Test methods for natural stone determination of the water absorption coefficient by capillarity), EN 1926 (Determination of the compressive strength), EN 1936 (Determination of real and apparent density of the total porosities and EN 13755 (Determination of water absorption by atmospheric pressure). The behaviour of granite specimens at high temperatures was evaluated for three levels of temperature exposure (20 ° C, 400 ° C and 800 ° C) and two cooling modes, one abruptly, by adding water at the ambient temperature (20 °C) and the other in a natural way. It was possible to evaluate that the granites exposed to any increase in temperature showed a reduction in the elasticity module, in addition to a reduction in the compressive strength of granites exposed to the same temperatures but received thermal shock. A pattern was observed between the open porosities and the resistances of the granites, the Póvoa de Lanhoso granite, with the lowest open porosity (0.61 %), obtained the highest compressive strength 152.35 MPa. The Mondim de Basto granite, which had the highest open porosity (5.47 %), broke with 30.5 MPa.

Keywords: Stone masonry; granite, sudden cooling; thermal shock

Índice

Agradecimentos	iv
Resumo	vi
Abstract.....	vii
Índice	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de figuras	xiv
Lista de Acrônimos	xviii
1. Introdução.....	1
1.1. Contexto e motivação	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Método.....	2
1.4. Estrutura do documento	3
2. Estado da arte	4
2.1. Exemplos de edifícios históricos em centros urbanos sob a ação do fogo	10
2.2. Tipologias construtivas de edifícios	4
Arquitetura Vernácula	4
Alvenaria de Pedra	7
Alvenaria de pedra seca	8
Cantaria	8
Alvenaria ordinária.....	9
Alvenaria Mista	9
2.3. Materiais de construções em alvenaria	10
2.4. Principais tipos de pedra.....	14
2.5. Argamassas tradicionais.....	15
Argamassa de terra	18
Argamassa de Cal	18
2.6. Caracterização do fogo.....	19

2.7. Influência de altas temperaturas no comportamento da alvenaria.....	22
2.8. Influência de altas temperaturas nas propriedades físicas e mecânicas das pedras	25
2.9. Influência de altas temperaturas nas propriedades mecânicas das argamassas.....	29
3. Programa experimental: materiais e métodos.....	34
3.1. Absorção de água por capilaridade	35
3.2. Absorção de água por imersão.....	37
3.3. Massa volúmica aparente e porosidade aberta	39
3.4. Ensaio de compressão uniaxial após a submissão a altas temperaturas .	40
4. Resultados experimentais: apresentação e discussão	45
4.1. Resultados de absorção de água por capilaridade	45
4.2. Resultados de absorção de água por imersão	55
4.3. Resultados massa volúmica e porosidade aberta	59
4.4. Resistência à compressão de granitos sujeitos a elevadas temperaturas.	63
5. Considerações finais	79
5.1. Trabalhos futuros	79
6. Referências bibliográficas.....	81

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Local de extração das pedras(VASCONCELOS, 2005).....	2
Tabela 2 - Classificação das argamassas por funções (Veiga, 2012).....	17
Tabela 3 - Critérios de Exposição ao fogo.....	22
Tabela 4 - Resistência a à compressão de argamassas de CP com adição de EGAF em diferentes temperaturas.....	32
Tabela 5 - Resistência a à tração de argamassas de CP com adição de EGAF em diferentes temperaturas.....	32
Tabela 6 - Número de amostras por tipo de granito	34
Tabela 7 - Distribuição de granitos por patamar de temperatura/ resfriamento	41
Tabela 8 - Coeficiente de absorção por capilaridade PTM.....	46
Tabela 9 - Coeficiente de absorção por capilaridade MDB	46
Tabela 10 - Coeficiente de absorção por capilaridade PLA	47
Tabela 11 - Coeficiente de absorção por capilaridade PTA.....	47
Tabela 12 - Coeficiente de absorção por capilaridade PLM	48
Tabela 13 - Coeficiente de absorção por capilaridade MDM.....	48
Tabela 14 - Coeficiente de absorção por capilaridade PLA Perpendicular.....	52
Tabela 15 - Coeficiente de absorção por capilaridade PLM Perpendicular	52
Tabela 16 - Coeficiente de absorção por capilaridade PLM Paralelo	54
Tabela 17 - Coeficiente de absorção por capilaridade PLA Paralelo	54
Tabela 18 - Coeficiente de absorção de água por pressão atmosférica MDM ..	56
Tabela 19 - Coeficiente de absorção de água por pressão atmosférica PTM ...	56
Tabela 20 - Coeficiente de absorção de água por pressão atmosférica PLA....	57
Tabela 21 - Coeficiente de absorção de água por pressão atmosférica PTA	57
Tabela 22 - Coeficiente de absorção de água por pressão atmosférica MDB... 	58

Tabela 23 - Coeficiente de absorção de água por pressão atmosférica PLM ...	58
Tabela 24 - Massa volúmica aparente e porosidade aberta PTM	60
Tabela 25 - Massa volúmica aparente e porosidade aberta PTA	60
Tabela 26 - Massa volúmica aparente e porosidade aberta PLM	61
Tabela 27 - Massa volúmica aparente e porosidade aberta PLA.....	61
Tabela 28 - Massa volúmica aparente e porosidade aberta MDM.....	62
Tabela 29 - Massa volúmica aparente e porosidade aberta MDB	62
Tabela 30 - Valores médios de resistência a compressão	71
Tabela 31 - Impactos da temperatura na estrutura dos granitos.....	74

Lista de figuras

Figura 1 Construção vernácula no Brasil; (a) Construção Enxaimel - Santa Catarina; (b) Pau a Pique- Pernambuco Fonte: (Patrick, 2020)	5
Figura 2 – Exemplos de construção vernácula em pedra; (a) Cabana Chibotte – França; (b) Machu Picchu – Peru Fonte:(“chibote”) e (“Machu Picchu”).....	6
Figura 3 - Construção em granito ilha dos açores Fonte: (Viva Decora, 2021)..	8
Figura 4 - Alvenaria de pedra seca Fonte: Alvenaria de Pedra Seca, 2018	8
Figura 5 – Edifício em cantaria.....	9
Figura 6 - Armazém Grandella Fonte :(LOURENÇO, 2017)	11
Figura 7 - Incêndio entre as 05h21 e as 05h26.....	12
Figura 8 - Incêndio entre as 06h30 e 7h.....	12
Figura 9 - Curva temperatura-tempo de um incêndio real (DE FRANÇA, 2019)	20
Figura 10 - Sobre perfis I de aço em situação de incêndio paramétrico	21
Figura 11 - Gráfico de parâmetros paredes de alvenaria quando expostos a altas temperaturas.....	25
Figura 12 - Variação relativa na força de compressão	28
Figura 13 - Resistencia à flexão relativa.....	29
Figura 14 - Resistencia à flexão de argamassas de alta performance exposta a altas temperaturas.....	31
Figura 15 Etiqueta de identificação dos corpos de provas	35
Figura 16 - Linha de imersão dos corpos de prova.....	36
Figura 17 - Apoio dos corpos de prova	36
Figura 18 – Corpos de prova na estufa	38
Figura 19 - Pesagem hidrostática	39
Figura 20 - Blocos dentro do forno, pré-aquecimento	42
Figura 21 - Curva de aquecimento 400 °C	42
Figura 22 - Curva de aquecimento 800 °C	43

Figura 23 - Corpos de prova em resfriamento brusco	43
Figura 24 - Blocos pós aquecimento a 800 °C	43
Figura 25 - Bloco na prensa com LVDT	44
Figura 26 - Gráfico absorção por capilaridade PTM	49
Figura 27 - Gráfico absorção por capilaridade PTA.....	49
Figura 28 - Gráfico absorção por capilaridade PLM	50
Figura 29 - Gráfico absorção por capilaridade PLA	50
Figura 30 - Gráfico absorção por capilaridade MDM	51
Figura 31 - Gráfico absorção por capilaridade MDB	51
Figura 32 - Gráfico Absorção por capilaridade PLA Perpendicular	53
Figura 33 - Gráfico Absorção por capilaridade PLM Perpendicular.....	53
Figura 34 - Gráfico Absorção por capilaridade PLA Paralelo	55
Figura 35 - Gráfico Absorção por capilaridade PLM Paralelo.....	55
Figura 36 - Comparação entre porosidade e coeficientes de absorção de água por imersão e capilaridade	63
Figura 37 - Gráfico tensão x deformação PTM 20 °C	63
Figura 38 - Gráfico tensão x deformação PTA 20 °C.....	64
Figura 39 - Gráfico tensão x deformação PLM 20 °C	64
Figura 40 - Gráfico tensão x deformação PLA 20 °C	64
Figura 41 - Gráfico tensão x deformação MDM 20 °C.....	65
Figura 42 - Gráfico tensão x deformação MDB 20 °C	65
Figura 43 - Gráfico tensão x deformação PTM 400 °C arrefecimento gradual ..	66
Figura 44 - Gráfico tensão x deformação PTA 400 °C arrefecimento gradual ...	66
Figura 45 - Gráfico tensão x deformação PLM 400 °C arrefecimento gradual ..	66
Figura 46 - Gráfico tensão x deformação MDB 400 °C gradual	67
Figura 47 - Gráfico tensão x deformação PTM 400°C brusco.....	67

Figura 48 - Gráfico tensão x deformação PLM 400 °C brusco.....	68
Figura 49 -Gráfico tensão x deformação PTM 800°C brusco.....	68
Figura 50 - Gráfico tensão x deformação PLM 800°C brusco.....	69
Figura 51 - Gráfico tensão x deformação MDB 800 °C brusco	69
Figura 52 - Gráfico tensão x deformação PTM, 800 °C normal.....	70
Figura 53 - Gráfico tensão x deformação PLM 800 °C normal.....	70
Figura 54 - Gráfico tensão x deformação MDM 800 °C normal.....	70
Figura 55 - Gráfico tensão x deformação MDB 800 °C normal	71
Figura 56 - Comparação entre porosidade aberta, módulo de deformação e tensão máxima de ruptura	72
Figura 57 - Comparação entre temperaturas e modo resfriamento granito PTM	73
Figura 58 - Comparação entre temperaturas e modo resfriamento granito PLM	73
Figura 59 - Granitos PTA e MDB após exposição a 800 °C e resfriamento natural	74
Figura 60 - Granitos MDM e PTM (direita) após exposição a 800 °C.....	75
Figura 61 - Granitos PLM e PLA após exposição a 800 °C e resfriamento natural	75
Figura 62 - Comparação entre temperaturas e modo resfriamento granito MDB	76
Figura 63 - Comparação entre temperaturas e modo resfriamento granito PTA	76
Figura 64 - Comparação entre temperaturas e modo resfriamento granito MDM	77
Figura 65 - Comparação entre temperaturas e modo resfriamento granito PLA	77
Figura 66 - Blocos antes e depois de aquecimento a 800 °C.....	78

Lista de Acrônimos

A	Área da base dos corpos de prova
CP	Cimento Portland
EGAF	escoria granulada de alto forno
EPI	Equipamento de proteção individual
G0	argamassa de alta performance
G5	argamassa de alta performance com 5% de adição de grafite em pó
IDH	Índice de desenvolvimento Humano
LVDT	Transdutor para medição de deslocamento linear
md	Massa seca
MDB	Mondim de Basto Branco
MDM	Mondim de Basto Amarelo
mf	Massa final
PLA	Póvoa de Lanhoso Azul
PLM	Póvoa de Lanhoso Amarelo
PTA	Ponte Lima azul
PTM	Ponte Lima amarelo
yi	Coeficiente de absorção de água em g/m ²

1. Introdução

1.1.Contexto e motivação

Os efeitos causados pelo aumento da temperatura global no planeta são cada vez mais evidentes, gerando prejuízos não só em vidas humanas, como nos legados deixados por diversas gerações. Um dos efeitos diretamente ligado a esse evento consiste no aumento do número de incêndios rurais e da sua severidade, que possuem um potencial de destruição elevado não só para a fauna e a flora do local, mas também para o património vernáculo constituído. As construções vernáculas encontradas nesses locais são majoritariamente compostas por alvenaria de pedra de junta seca, alvenaria de pedra com argamassa de cal ou alvenaria de pedra com argamassa à base de terra. Os efeitos causados pelos incêndios nestas construções resultam em uma alta destruição dessas construções, acabando com o legado histórico proporcionado por elas.

Embora existam estudos direcionados à ação do fogo em alvenarias de pedra, ficou evidenciado, após o incêndio na Catedral de Notre-Dame, em França, que é necessário aumentar o número de pesquisas nessa área, de modo a compreender melhor como as estruturas respondem à exposição a elevadas temperaturas. É necessário avaliar a condição para reabilitação de uma construção após a exposição ao fogo, evidenciando as possíveis vulnerabilidades, assim como a alteração das propriedades mecânicas da alvenaria.

É importante ressaltar que a EN 777-6:2000 considera como pedras naturais:

- magmáticas – rochas formadas pelo resfriamento e solidificação do magma, e.g. granito e basalto;
- sedimentares – rochas formadas pela deposição e consolidação de partículas inorgânicas, e.g. Calcário e granito
- metamórficas – rochas resultantes de calor e pressão em rochas já existentes, e.g. quartzo e mármore

A referida norma EN 777-6:2000 também determina que, somente quando for relevante para o uso, deve ser informado pelo vendedor/fornecedor as propriedades térmicas da pedra de acordo com EN 1745:2012. Com isso, muitas vezes essas

informações são deixadas de lado, uma vez que inicialmente não acredita em seu contato com fogo. Além disso, muitas construções foram feitas antes da existência da norma EN 777-6:2000, com isso existe menos informação disponível. Além disso, a alvenaria de pedra pode ser aplicada quando há uma limitação econômica, baseando-se em uma mão de obra pouco qualificada, e com uma utilização de materiais conforme a disponibilidade local. Sendo assim, é mais difícil encontrar um padrão que se aplica a todas as estruturas, reforçando a necessidade de expandir os conhecimentos nessa área.

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento físico e mecânico de alvenarias de pedra, em particular do granito, quando submetidos a altas temperaturas que podem resultar da ocorrência de incêndios. Para este efeito, foram utilizados granitos da região norte de Portugal, nomeadamente o granito de Póvoa de Lanhoso (PLA azul e PLM amarelo), granito de Ponte de Lima (PTA azul e PTM amarelo) e granito de Mondim de Basto (MDB branco e MDM amarelo), cortados em blocos com dimensões de 70 mm x 70 mm x 70 mm. A descrição petrográfica simplificada destes granitos encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Local de extração das pedras(VASCONCELOS, 2005)

Local de extração do granito	Designação do granito	Descrição petrográfica
Ponte de Lima	PTM	Granito de duas micas, grão fino e médio
	PTA	
Mondim de Basto	MDM	Granito de duas micas de grão médio
	MDB	
Póvoa do Lanhoso	PLM	Granito biotítico, grão médio a grosseiro porfiróide
	PLA	

1.3. Método

No sentido de avaliar o efeito de temperaturas elevadas no comportamento mecânico de diferentes tipos de granito, Os blocos foram expostos a diversos testes conforme

as normas europeias e foi definido um programa experimental composto por três fases: (1) Caracterização física dos granitos, para obtenção da massa volúmica, porosidade aberta e coeficientes de absorção de água por imersão e capilaridade; (2) exposição dos granitos a altas temperaturas (400°C e 800C) seguida de duas possibilidades de arrefecimento: (a) arrefecimento natural à temperatura ambiente; (b) arrefecimento brusco por imersão dos corpos de prova em água à temperatura ambiente; (3) caracterização do comportamento mecânico dos granitos com base em ensaios de compressão uniaxial. Os ensaios serão realizados em todos os granitos sujeitos a diferentes condições de exposição. Dos resultados destes ensaios pretende-se avaliar o efeito do nível de temperatura de exposição e condições de arrefecimento no comportamento mecânico dos granitos. Pretende-se também relacionar o comportamento mecânico com as propriedades físicas obtidas na Fase 1 do trabalho.

1.4.Estrutura do documento

O presente documento está dividido em 5 capítulos, conforme descrito na sequência:

O capítulo 1 apresenta uma introdução e a motivação que levou ao estudo do efeito de altas temperaturas nos blocos de alvenaria de pedra de granito, os objetivos a serem alcançados e modo de estruturação da dissertação.

O capítulo 2 apresenta o estado da arte, onde é apresentado todo o contexto de inserção da história das construções vernáculas e os diferentes modos construtivos de alvenaria de pedra. Além disso, é abordado o comportamento do fogo em construções históricas e seu impacto nas características físicas das alvenarias e argamassas.

O capítulo 3 descreve o programa experimental, onde são detalhados todos os métodos/procedimentos e ensaios realizados, bem como as normas de ensaio utilizadas.

O capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos nos ensaios realizados no programa experimental.

O capítulo 5 expõe as conclusões obtidas após a realização do trabalho, além de analisar as possibilidades de trabalhos futuros de modo a abranger os estudos a realizar na área.

2. Estado da arte

Este capítulo aborda a história das construções vernáculas, focando nas alvenarias de pedra de modo a contextualizar a base do estudo. Serão abordados os modos de construção desse tipo de alvenaria, bem como os elementos que caracterizam sua heterogeneidade, material da pedra e tipos de argamassa. Além disso, serão explicitados estudos anteriores feitos na área, que evidenciem mudanças nas propriedades mecânicas dos elementos. Com base nos aspectos citados serão elaborados testes laboratoriais para evidenciar os efeitos das altas temperaturas nas alvenarias de pedra.

2.1. Tipologias construtivas de edifícios

Arquitetura Vernácula

Ao abordar estruturas de pedra, é muito importante revisar o contexto histórico no qual elas foram desenvolvidas, para isso é necessário entender a história por trás das construções vernáculas. Elas provêm de um conjunto de habilidades construtivas diretamente ligadas à região do mundo em que foram desenvolvidas, o tipo de clima, além de sua conexão com a cultura local. Essas características ficam evidenciadas ao comparar os diferentes tipos de construção vernácula pelo mundo, desde os iglus, construção característica do Polo Norte às palafitas encontradas na Amazônia Brasileira. De acordo com Santos e Costa (2017), a arquitetura feita pelo povo evidencia as particularidades do local onde está inserida, mostrando a capacidade da população local em utilizar os recursos disponíveis necessários à construção.

A construção vernácula é tão antiga quanto a civilização humana, existindo desde que essa foi capaz de construir abrigos para se proteger, usando na construção os materiais disponíveis na natureza envolvente. É por este motivo que a construção vernácula apresenta características e materiais tão diferentes em diversas regiões do mundo.

No Brasil, devido à grande influência europeia no Sul, verifica-se a utilização da técnica enxaimel de construção, que consiste em hastes de madeiras encaixadas paralelamente com diferentes inclinações, cujos espaços vazios são preenchidos por

alvenaria de pedra ou tijolo. Essa técnica tem perdurado por várias gerações, ver Figura 1a.



(a)



(b)

Figura 1 Construção vernácula no Brasil; (a) Construção Enxaimel - Santa Catarina; (b) Pau a Pique- Pernambuco Fonte: (Patrick, 2020)

Em outras regiões do Brasil, como Norte e Nordeste, é possível encontrar construções mais antigas do que as presentes no Sul, onde se usam técnicas construtivas bem menos avançadas, como por exemplo o pau a pique (Figura 1b). Esta técnica construtiva caracteriza-se pela utilização de uma estrutura de madeira entrelaçada, amarrada com bambu e no preenchimento dos vãos com barro.

Estas duas regiões com menores índices IDH (Índice de desenvolvimento Humano) do Brasil é possível ver o reflexo econômico nos materiais utilizados, estando diretamente ligados à qualidade da construção. Além disso, o clima mais quente é levado em consideração no desenvolvimento da técnica.

É importante ressaltar que alguns autores Brasileiros não gostam da terminologia Arquitetura Vernacular, devido à origem inglesa da palavra, preferindo denominar essa arquitetura como popular. Embora a nomenclatura seja diferente, o conceito empregado é o mesmo.

Em zonas onde a pedra é abundante é muito frequente encontrar construções vernáculas em pedra. Em geral as pedras são facilmente trabalháveis e apresentam resistência elevada. É possível encontrar diversos tipos de construções vernaculares feitas com esse material ao redor do mundo (SANTOS; COSTA, 2017). É interessante observar que embora utilizem um material em comum, muitas vezes as construções têm objetivos extremamente diferentes. No século XX, na França, eram comuns as construções de cabanas de pedra seca denominadas chibotte conforme indica a Figura 2a. Sua função era abrigar sazonalmente os proprietários de campos e vinhedos.



(a)



(b)

Figura 2 – Exemplos de construção vernácula em pedra; (a) Cabana Chibotte – França; (b) Machu Picchu – Peru Fonte: (“chibote”) e (“Machu Picchu”)

A Figura 2b mostra uma importante construção feita em pedra, classificada como uma das sete maravilhas do mundo, Machu Picchu, situada no Peru. A cidade Inca é completamente construída em pedra de junta seca (sem juntas de argamassa). Embora tenha sido construída no século XV, a engenharia por trás da cidade é considerada bem avançada. É importante ressaltar que o Peru é uma região instável, sofrendo muito com abalos sísmicos, sendo a cidade de Machu Picchu construída em cima de duas falhas geológicas. Graças a técnica de construção utilizada, a cidade é capaz de suportar muito bem os terremotos ocorridos na região, algo bem incomum para esse tipo de construção.

A utilização das construções de pedra em Portugal é mais predominante no Norte e centro do país, onde grande parte das construções vernáculas mais antigas em meios rurais e centros urbanos são construídos em pedra. A utilização predominante da pedra está relacionada com a sua disponibilidade. No Norte de Portugal predomina o granito, enquanto no centro, em algumas zonas mais litorais predomina o calcário. O xisto é também utilizado em algumas zonas mais interiores. O método consiste na sobreposição de pedras de diversas formas e tamanhos podendo ou não utilizar material ligante. Esse método pode ser utilizado na construção de paredes com ou sem função estrutural, além de muros, escadas e em outros processos construtivos.

Alvenaria de Pedra

As alvenarias de pedra têm forte caracterização pelos materiais encontrados nas proximidades da obra, com isso as paredes possuem diferentes formas, irregularidades e tamanhos. É importante ressaltar que nas construções vernaculares de alvenaria de pedra, o assentamento pode ser feito com juntas secas (quando não existe argamassa) e com a alocação das pedras umas em cima das outras (ROSA, 2013). Além disso, podem ser usadas argamassas à base de cal e à base de terra. As alvenarias de pedra apresentam um comportamento frágil à tração e uma certa ductibilidade à compressão. Entretanto, a grande variedade em suas propriedades mecânicas provém da não padronização do seu processo construtivo, diferentes geometrias e propriedades das pedras utilizadas, que possuem um papel fundamental na qualidade da construção. Estudos mostram que o entrelaçamento e o posicionamento das pedras são importantes fatores na capacidade resistiva à compressão da parede, uma vez que a deformação da alvenaria está diretamente ligada à deformação ocorrida nas juntas, uma vez que um deslizamento de parte dos materiais resulta em uma recolocação das pedras,(GUEDES; COSTA, 2010).

As alvenarias de pedra podem ser caracterizadas pelo levantamento da sua geometria, pelas técnicas construtivas utilizadas e pelos materiais utilizados. Não é possível determinar um modo único de construção para as alvenarias de pedra, uma vez que os materiais e técnicas construtivas variam em diferentes períodos, localidades, disponibilidade e custo (PINHO, 2007). Em Portugal as alvenarias de

pedra são divididas em quatro grupos, que serão descritos a seguir. A figura 3 mostra uma construção em granito.



Figura 3 - Construção em granito ilha dos açores Fonte: (Viva Decora, 2021)

Alvenaria de pedra seca

Existe pouca ou nenhuma argamassa, comum em construções rudimentares, principalmente construída de Xisto ou granito. Pedras menores são usadas como calço para as maiores, de forma a estabilizar a parede, conforme mostra a Figura 4.



Figura 4 - Alvenaria de pedra seca Fonte: Alvenaria de Pedra Seca, 2018

Cantaria

É limitada em elementos exteriores como cunhais, colunas e pilastras. Historicamente tem boa durabilidade devido a boa qualidade da mão de obra necessária para sua

execução, uma vez que procuram ornamentar as construções (GOYENA e FALLIS, 2019). Um exemplo de alvenaria de cantaria é mostrado na Figura 5.

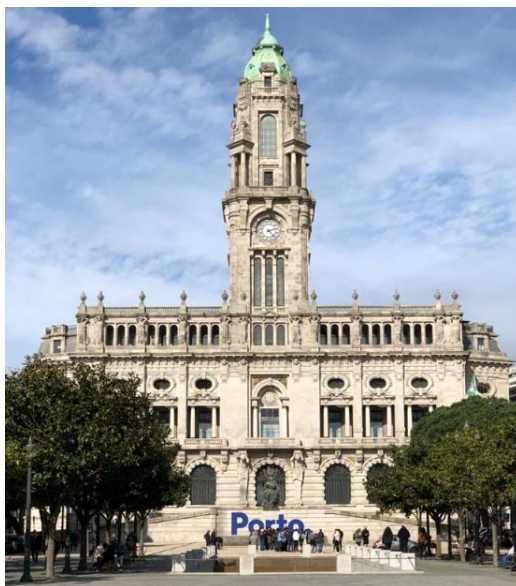


Figura 5 – Edifício em cantaria

Alvenaria ordinária

Constituída principalmente de pedras irregulares e ligadas por argamassa de cal. Esse método foi utilizado na maioria das construções de pedras portuguesas, estando presente tanto nas zonas urbanas quanto rurais. Elas possuem um sistema de construção mais avançado, o primeiro passo são as fundações, seguidas da marcação, que define a espessura das paredes. Com essa definição são selecionadas as pedras que serão utilizadas na construção. Dado o início da construção, é necessário garantir uma boa aderência entre as fiadas por meio de um bom preenchimento com argamassa. É importante ressaltar que essas construções possuem paredes com e sem função estrutural. Sendo as paredes com função estrutural responsáveis, principalmente, pela resistência à compressão, garantindo a verticalidade e, conseqüentemente, a estrutura da construção. Devido a essa importante função estrutural, normalmente as paredes possuem espessura elevada (GENTILE et al., 2015).

Alvenaria Mista

É composta por pedras de diferentes origens, podendo estar misturadas entre si. Alguns dos principais exemplos dos compostos são granito calcário e xisto, entretanto,

também é possível encontrar elementos argilosos, madeira e ferro (PINHO, 2007). A principal técnica utilizada nas alvenarias mistas é a gaiola de madeira, que trabalha em conjunto com as paredes de pedra, proporcionando uma melhor resistência contra abalos sísmicos (PINHO, 2007).

2.2.Exemplos de edifícios históricos em centros urbanos sob a ação do fogo

Um caso famoso de incêndio ocorrido em Portugal foi o incêndio do Chiado, um dos centros urbanos antigos mais emblemáticos da cidade de Lisboa. O incêndio ocorreu em 25 de agosto de 1988, matando duas pessoas e destruindo cerca de 10000 m² de área edificada. Esse acontecimento foi um importante marco para o aumento da segurança dos edifícios e o modo de operação do combate ao incêndio. Para entender melhor o caso, é preciso entender a história por trás das construções que ocupavam o local, uma vez que estas sofreram grande impacto após o terremoto ocorrido em 1755, onde diversos danos foram causados na capital portuguesa, sendo necessário um grande processo de reconstrução. Com isso, surgiram novos conceitos no âmbito da construção, de modo a combater a ação sísmica. Uma das soluções mais adotadas foi a gaiola Pombalina: “complicado encadeamento de traves e numa complexa e sistemática rede de madeiramentos que podiam [e podem], até certo ponto resistir às oscilações do solo” (BARREIROS, 1887). Posteriormente, parte dos edifícios construídos com essa técnica foram substituídos pelo estilo gaioleiro, também chamados de prédios de rendimento, que surgiram pela demanda do mercado imobiliário, que fizeram com que muitos construtores economizassem na qualidade dos materiais de modo a ganhar tempo e dinheiro, o resultado foram edificações com baixo teor de segurança. Esses edifícios eram caracterizados pelo alto número de pavimentos (geralmente 4 ou 5), maiores áreas de implantação, grande número de janelas com dimensões largas fatores que aumentaram a vulnerabilidade ao fogo. Existem duas hipóteses de como ocorreu o início do fogo: o incêndio teve uma ignição invisível e oculta por vários minutos e, quando ocorreu o flash over, propiciaram-se as circunstâncias para ser detectado, ou o incêndio teve uma ignição bastante violenta, associada a uma rápida propagação que em poucos minutos atingiu grandes proporções, Figura 6 (LOURENÇO, 2017).



Figura 6 - Armazém Grandella Fonte : (LOURENÇO, 2017)

Os relatos do Regimento de Sapadores Bombeiros (RSB) citam o fogo já presente em todos os pavimentos do armazém, com chamas e gases saindo pelas janelas, atingindo os revestimentos de madeira e plástico dos edifícios adjacentes. O incêndio se espalhou rapidamente, atingindo os armazéns do Chiado, obrigando as autoridades a se desdobrarem para combatê-lo, resultando em um elevado número de feridos: 10 cidadãos, 60 bombeiros e 3 agentes da PSP. É importante ressaltar que muitos ferimentos foram causados pela falta de equipamentos de segurança adequados, reforçando a falta de preparo ao combate ao incêndio no século XX. As Figuras 7 e 8 mostram a propagação do incêndio em diferentes horários.

Segurança contra Riscos de Incêndio em Centros Urbanos Antigos. Outra medida importante adotada após o incêndio foi a obrigatoriedade na utilização de EPIs (Equipamento de proteção individual), uma vez que a falta destes teve um grande impacto nos ferimentos causados no incêndio. No estudo feito por Lourenço (2017), o autor relatou que uma das maiores dificuldades foi obter dados sobre o incêndio, a partir disso, pode-se analisar que a dificuldade no acesso as informações atrapalham o desenvolvimento de estudos no âmbito de incêndios, e sem a elaboração de estudos dificulta-se a evolução nos processos de combate e prevenção ao incêndio.

Incêndios em construções históricas de alvenaria de pedra, mostraram a importância de se analisar os danos sofridos pelas estruturas ao entrar em contato com fogo. É necessário o conhecimento das propriedades do material antes e depois do incêndio de modo a providenciar a melhor solução para o problema. São vários os exemplos de edifícios em alvenaria com valor histórico que foram submetidos à ação do fogo e que tiveram consequências devastadoras. Um dos casos mais recentes ocorreu na catedral de Notre-Dame em Paris, em abril de 2018. A igreja de estilo gótico que passava por reformas, pegou fogo por causas desconhecidas até hoje e em 14 horas destruiu 850 anos de história. Em sua composição era possível encontrar as paredes de pedras, juntamente com estruturas de madeira e metais, que foram em grande parte consumidos pelas chamas. Um dos locais mais afetados foi a chamada floresta, que ficava localizada no telhado da igreja e contava com 1300 vigas de madeira, provenientes de árvores de carvalho com mais de 300 anos. Uma das principais preocupações do incêndio era poluição causada pelo derretimento do chumbo, que servia de camada protetora, entretanto, pesquisas realizadas no local concluíram que as chamas não chegaram a 1700°C, temperatura necessária para que o chumbo evapore.

Ao analisar os danos sofridos em alvenarias de pedra expostas a um incêndio, é importante levar em consideração o tipo de pedra afetada, juntamente com a temperatura alcançada pelo fogo. Temperaturas mais baixas tendem a não modificar a resistência da pedra, a principal mudança tende a ser mudança de cor, baseado na reação química dos seus componentes.

Após o estudo realizado, pode-se notar a grande vantagem construtiva em alvenarias de pedra na decorrência de um incêndio, uma vez que o material possui uma alta

resistência ao fogo, já que ele não entra em decomposição com as temperaturas alcançadas por incêndios tradicionais. Com isso, ao se comparar com os demais materiais presentes nas construções estudadas, como por exemplo a madeira, é possível constatar a vantagem na utilização da pedra.

2.3. Materiais de construções em alvenaria

Os principais componentes de uma parede de alvenaria são as unidades e as argamassas. No processo de construção de uma alvenaria, são necessários equipamentos para uma boa execução, dentre esses equipamentos temos réguas de alinhamento e de nível, prumo e no caso de paredes argamassadas, utiliza-se o alisador de juntas e a colher de pedreiro. A argamassa tem como função garantir a união entre as unidades, assegurando uma distribuição uniforme das cargas verticais, a selagem das juntas e a absorção de deformações. A unidade, que pode ser feita de diferentes materiais, como tijolo e pedra, serve para vedar (alvenarias de vedação) e resistir aos carregamentos (alvenaria com função estrutural). Na construção deve-se marcar o começo e fim da parede, ou com a primeira fiada ou cavando o solo, no caso de algumas alvenarias de pedra. Também deve ser marcada a altura e o nivelamento da parede, levando em consideração o encunhamento, espaçamento que leva em consideração a deformação da estrutura. É importante ressaltar, que blocos sem função estrutural não podem ser utilizados em alvenarias estruturais, uma vez que a resistência característica à compressão destes blocos é inferior aos limites estabelecidos pelas normas técnicas. Além disso, no caso das alvenarias estruturais, são utilizadas argamassas com maior capacidade resistente, uma vez que as argamassas têm a função de transmitir e de resistir às cargas e deformações impostas à estrutura.

2.4. Principais tipos de pedra

Os principais tipos de pedra utilizados nas alvenarias são: granito, calcário e arenito.

O granito é uma rocha ígnea composta de quartzo, feldspato e mica, podendo ser encontrada em diversas cores, como branco, preto, azul, verde, amarelo e marrom. É uma rocha com alto grau de dureza, que vem sendo utilizada na construção desde o Egito antigo até os dias de hoje. Os pontos pretos, comuns na pedra, correspondem aos grãos de quartzo, já a coloração do granito corresponde ao feldspato, uma vez

que esse mineral pode apresentar diversas tonalidades. A escolha do granito tem como base sua alta dureza medida pela escala Mohs, escala que mede a resistência de um material ao risco com variação de 1 a 10, onde 1 é o material menos duro da escala, o talco e 10 o diamante (VAZ e CARNEIRO, 2016). O granito apresenta dureza entre 6 e 7, sendo duas vezes mais resistente que o mármore. O granito é o material mais utilizado em construções de alvenaria de pedra em Portugal.

O calcário é uma rocha sedimentar que contém minerais com quantidades acima de 30% de carbonato de cálcio (aragonita ou calcita). O mineral puro de carbonato de cálcio se chama calcite, entretanto, na natureza é comum ocorrerem reações químicas onde os íons de cálcio (Ca) são trocados por íons de Magnésio (Mg), gerando os denominados Calcários Dolomíticos. É importante analisar as impurezas do calcário, uma vez que elas influenciam o aspecto econômico da rocha já que um processo de decomposição afeta a utilidade da rocha (SAMPAIO e ALMEIDA, 2008).

O arenito é uma rocha sedimentar composta principalmente por grãos de quartzo ligados por sílica ou carbonato de cálcio. É uma das rochas mais abundantes na crosta terrestre e pode variar sua cor de acordo com a composição dos ligantes, sendo as cores principais cinza, amarela, branca e vermelha. Na Europa, é comum a presença de arenito nas catedrais e castelos de estilo gótico e românico, além disso o Egito e a Índia são grandes ícones das construções em arenito (BALTAZAR, [s.d.]

2.5.Argamassas tradicionais

A argamassa é uma parte importante de qualquer construção, tendo funções não só de acabamento, mas de vedação e estruturação. Essa mistura homogênea de agregados miúdos vem sendo utilizada a muito tempo, e as construções vernaculares de pedra não são exceção. As principais funções das argamassas podem ser categorizadas como:

- argamassas de assentamento (função estrutural)
- argamassas de impermeabilização de juntas (funções de proteção à água e ao ar e decorativa)
- argamassas de reboco exterior (funções de proteção às ações externas e funções decorativas)
- argamassas de reboco interior (funções estéticas)

- argamassas de assentamento de azulejos (funções de colagem)

É possível classificar as funções da argamassa como base nos seus requisitos. De acordo com o comitê RILEM TC 203-RHM: Repair mortars for historic masonry. The role of mortar in masonry: an introduction to requirements for the design of repair mortars, é possível classificá-las por seus requisitos técnicos conforme apresentado na Tabela 2. (VEIGA, 2012)

Tabela 2 - Classificação das argamassas por funções (Veiga, 2012)

Classificação das argamassas por funções					
Relevância dos requisitos técnicos					
Requisitos Técnicos	Assentamento	Fechamento de juntas	Reboco exterior	Caldas (grout)	Revestimento interior
Aderência	3	3	3	2	3
Resistência mecânica (flexão e compressão)	2*	2*	1*	2*	1*
Deformação (E)	3	3	2	3	1
Proteção às ações climáticas					
Resistência à penetração da água	2	3	3	1	1
Resistência ao gelo	2	3	3	1	0
Dilatação térmica	1	1	3	1	3
Permeabilidade ao vapor de água	2	3	3	1	3
Comportamento à molhagem e secagem	2	3	3	1	2
Estética	1	3	3	0	3

* Em relação ao substrato, os valores de resistência a compressão e deformabilidade da argamassa devem ser menores do que os das unidades de alvenaria
(0 = sem importância a 3= muito importante)

Fonte :(VEIGA, 2012)

Argamassa de terra

As argamassas de terra possuem um ponto comum com as construções vernáculas, uma vez que ambas se baseiam na utilização de materiais locais em sua constituição. Com isso, diferentes localidades influenciam neste tipo de argamassa, uma vez que os solos que dão base à terra possuem diferentes características. A argila tem a função ligante proveniente da mistura das partículas finas com água. Esta gera um composto que ao endurecer promove a ligação entre os agregados. É importante ressaltar que a argamassa à base de terra é suscetível a mudanças nas suas propriedades mecânicas quando há alterações nas proporções de materiais e no teor de umidade. Ao aumentar o teor de argila também se aumenta a resistência à compressão, sem afetar a rigidez, entretanto, ao aumentar o teor de água existe uma redução na resistência e na rigidez.(FEIGLSTORFER; GRUBER; SCHROEDER, 2016).

Argamassa de Cal

A argamassa a base de cal está presente em grande parte das construções históricas portuguesas. A qualidade desse tipo de argamassa está diretamente ligada ao tipo de cal utilizada, pasta ou pó, além dos agregados. Existem dois grupos de cals, as com propriedades hidráulicas e as aéreas. A primeira endurece na presença de água, já a segunda endurece pelo lento processo de carbonatação. A cal aérea foi amplamente utilizada em patrimônios históricos devido à baixa energia gasta no processo de fabricação, esse fato também a torna uma das mais sustentáveis (AGGELAKOPOULOU e ARIZZI, 2012) citado por (SOUSA, 2016).

Esses fatores influenciam o tempo de cura e as propriedades hidráulicas. A argamassa de cal possui baixa resistência, além de endurecer de forma mais lenta, o que permite uma remodelação até horas depois de sua aplicação. Sua alta deformabilidade permite a passagem de vapor de água e pequenas movimentações (FEIGLSTORFER; GRUBER e SCHROEDER, 2016)

2.6. Caracterização do fogo

Incêndio é definido como um fogo que foge do controle, consumindo o que não deveria ser consumido, podendo proporcionar danos à vida, patrimônio e meio ambiente (FLORES et al., 2016). A combustão é uma reação química exotérmica entre combustível e comburente, gerando luz e calor. Para que ela aconteça são necessários quatro elementos, o combustível, o comburente, o calor e a reação em cadeia. Os combustíveis podem se apresentar em todos os estados da matéria: sólido, líquido e gasoso, sendo definido como toda substância capaz de queimar e propiciar a propagação do fogo. O comburente é o elemento que torna as chamas mais intensas e brilhantes durante a combustão. O principal comburente é o oxigênio, elemento que constitui 21% do ar, com isso, é possível evidenciar a relação entre a quantidade de oxigênio e a intensidade da combustão. Em uma concentração entre 9-15%, existe uma grande presença de brasas e chamas menos intensas, já em uma concentração inferior a 9% resulta na finalização da combustão. O calor é a energia capaz de iniciar, manter e propagar a reação entre o combustível e o comburente, sendo possível observar a troca de energia entre ambientes, com base na diferença de temperatura entre eles. A reação em cadeia ocorre no ponto onde a queima se torna autossustentável, para que isso aconteça, o calor das chamas precisa decompor o combustível em partículas. Essas partículas se combinam com o comburente, queimando e gerando mais calor, com isso fechando o ciclo, gerando a reação em cadeia (FLORES et al., 2016).

O incêndio possui três fases: ignição, aquecimento e resfriamento (Figura 9). A primeira fase, também chamada de pré-flashover é composta por um incêndio de pequenas proporções que não afeta a estrutura, a temperatura fica um pouco acima da temperatura ambiente, por volta de 38 °C. O flash over representa a transição entre a primeira e segunda fase. Ele ocorre quando há uma inflamação generalizada, envolvendo todo o compartimento, isso ocorre devido à condução do oxigênio para dentro do ambiente devido à pressão negativa causada pela convecção. Nessa fase o ar quente ascende no local fazendo com que o ar frio entre por aberturas para ocupar os pontos mais baixos. Na segunda fase, ocorre o aquecimento proveniente da entrada de todo o material combustível em estado de combustão, com isso ocorre uma rápida elevação na temperatura do local, superior aos 300 °C. A última fase compõe o resfriamento, que pode ser causado tanto naturalmente como por

intervenção humana. A primeira alternativa se deve a combustão de todo o material combustível presente no local, com isso a temperatura diminui gradativamente. O segundo método pode ocorrer de diferentes formas, uma delas consiste no lançamento de um agente extintor, normalmente água. Esse agente absorve mais calor do que o incêndio consegue produzir. Outro método utilizado é a quebra da reação em cadeia por meio do lançamento de produtos químicos que inibem a capacidade reativa do comburente com o combustível, dando fim a reação.

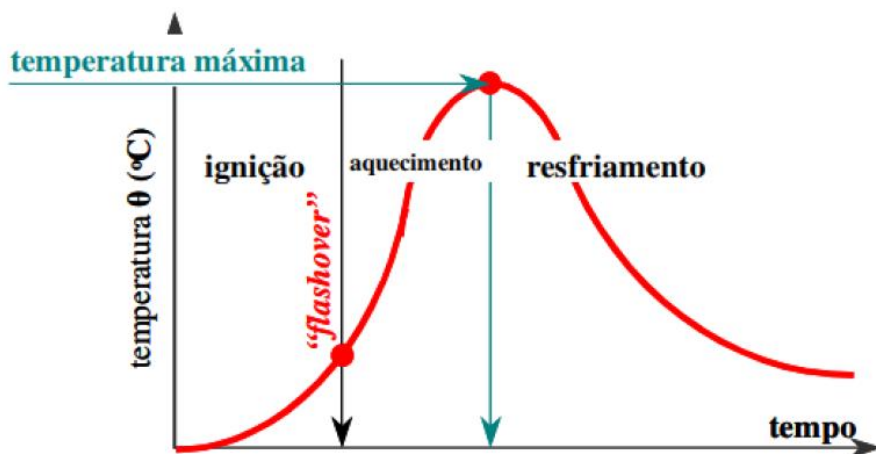


Figura 9 - Curva temperatura-tempo de um incêndio real (DE FRANÇA, 2019)

A principal curva e mais utilizada é a curva de incêndio padrão ISO 834 e sua principal função é classificar elementos estruturais (FRANSSEN e VILA REAL, 2010) citado por (REIS, 2011). Nela é possível observar o aumento da temperatura em relação ao tempo, independente da carga de incêndio, propriedades térmicas dos materiais, entre outros. A análise mais aceita na comparação entre a curva padrão com a curva de incêndio real é o fato da curva padrão se iniciar no instante do flash over, conforme mostra a Figura 10

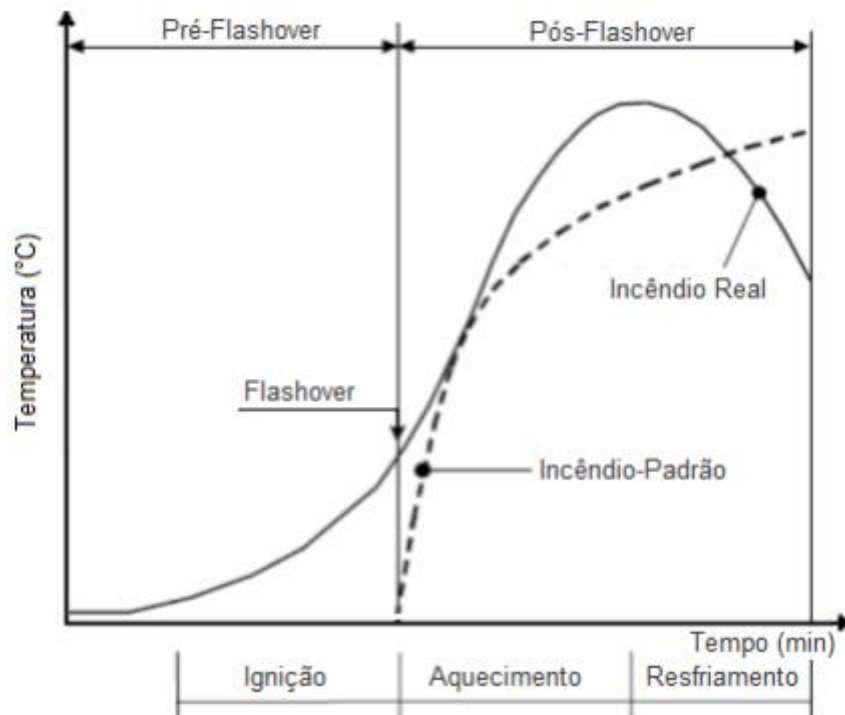


Figura 10 - Sobre perfis I de aço em situação de incêndio paramétrico

Fonte: (MEL, 2016)

A equação que define a curva é

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (1)$$

em que:

θ_g – temperatura dos gases no compartimento de incêndio [$^{\circ}\text{C}$]

t – Tempo [min].

Existem algumas limitações ao usar a curva ISO 834:

- desconsidera a fase pré-flashover;
- independe da carga de incêndio e das condições de ventilação;
- não decresce.

2.7. Influência de altas temperaturas no comportamento da alvenaria

A ocorrência de um incêndio em uma construção dificilmente é voluntaria, sendo em sua grande maioria gerado pelo fator humano (ICNF, 2014). Com propósito de padronizar a resistência ao fogo e limitar os riscos à sociedade, em 2005 foi criado o Eurocode 6, 2005. Este documento determina que todas as novas construções devem ser projetadas levando em consideração a ocorrência de um incêndio no local. Com isso, é necessário que os componentes que têm função estrutural mantenham sua resistência por um determinado período durante a ocorrência de um incêndio. Além disso, o espalhamento do fogo deve ser limitado dentro e fora da construção. A tabela 3 mostra os critérios de exposição ao fogo por tipo de função da alvenaria e o X indica o critério que deve ser garantido.

Tabela 3 - Critérios de Exposição ao fogo

Função	Resistência mecânica	Integridade	Isolamento	Impacto Mecânico
Estrutural	X			
Compartimentação		X	X	
Estrutural e Vedação	X	X	X	
Estrutural, Vedação e Impacto Mecânico	X	X	X	X
Vedação e Impacto Mecânico		X	X	X

Fonte: Eurocode 6,2005

Nos ensaios de elementos expostos ao fogo, podem ser avaliados os seguintes comportamentos:

- Capacidade de resistência;
- Estantidade às chamas e gases;
- Isolamento térmico.

A capacidade de resistência define-se como o tempo em minutos, durante o qual, a amostra ensaiada mantém a sua capacidade de carga, sem exceder os limites de deformação e a respetiva velocidade de deformação, pré-estabelecidos pela norma (EN 1365-1).

A estantidade às chamas e gases é avaliada pelo tempo em minutos, no qual a amostra mantém a sua função de compartimentação, sem verificar a presença de ignição do tampão de algodão, de penetração do calibre de abertura ou de chamas constantes.

Quanto ao isolamento térmico, é avaliado pelo tempo em minutos, no qual a amostra mantém as suas funções de separadora, sem desencadear temperaturas elevadas na face não exposta, de acordo com:

- O aumento da temperatura média sobre a temperatura média da face da amostra no início do ensaio não seja superior a 140 °C;
- O aumento da temperatura em qualquer ponto não ultrapasse a temperatura média inicial de 180 °C.

O critério de isolamento térmico não é verificado sempre que seja violado um dos critérios acima referidos. Durante o período de projeto, deve ser feita uma análise estrutural do fogo, levando em consideração a estrutura exposta ao fogo, com isso, podem ser adicionados sistemas de aspersores, extintores de incêndio e materiais isolantes.

Construções de alvenaria realizadas antes da criação da norma estão mais vulneráveis à exposição ao fogo, isso faz com que muitas das medidas necessárias para melhorar o combate ao incêndio entrem em conflito com a estética histórica da edificação (RUSSO; SCIARRETTA, 2013). Russo e Sciarreta (2013) analisaram dois famosos incêndios ocorridos em construções italianas: Capela do Santo Sudário em Turim e Moinho Stucky em Veneza. Em ambas as situações, o incêndio teve início em

um andaime situado em um local de trabalho, sendo rapidamente espalhado para as partes adjacentes da construção e tendo duração suficiente para causar danos estruturais significativos na capela e causar colapso parcial no moinho. Os principais impactos causados pelo fogo se deveram às falhas das estruturas metálicas e componentes estruturais, com exceção dos constituídos de alvenaria. No moinho, a falha do teto e dos pisos tiveram alta influência no colapso da torre adjacente, por outro lado, as paredes de alvenaria, embora também tenham sido expostas ao fogo resistiram sem maiores danos. Esses exemplos demonstraram a boa performance das paredes de alvenaria quando expostas ao fogo.

Nos testes realizados por Russo e Sciarretta (2013), onde blocos de alvenaria tradicional, com dimensões de $51 \times 51 \times 25 \text{ cm}^3$ foram expostos a temperaturas até 600°C foi possível observar um aumento no módulo de deformação até 300°C , seguido de uma queda constante, proporcional ao aumento da temperatura. O mesmo resultado pode ser observado nos testes para determinar a resistência à compressão. É importante ressaltar que o sucesso da parede de alvenaria provém do trabalho conjunto de bloco e argamassa, com isso, é necessário observar não só o comportamento individual dos componentes, como do conjunto como um todo. Embora o tijolo mantenha uma boa resistência à compressão quando aquecido, a argamassa evidencia uma degradação considerável, com isso o conjunto apresenta deformações devido ao dano causado na argamassa, sendo a principal delas a redução da rigidez (BOŠNJAK et al., 2020).

A Figura 11 mostra o efeito do aumento da temperatura na força de compressão, módulo de deformação, pico de tensão e tensão final. Os valores são comparados em relação ao valor absoluto inicial.

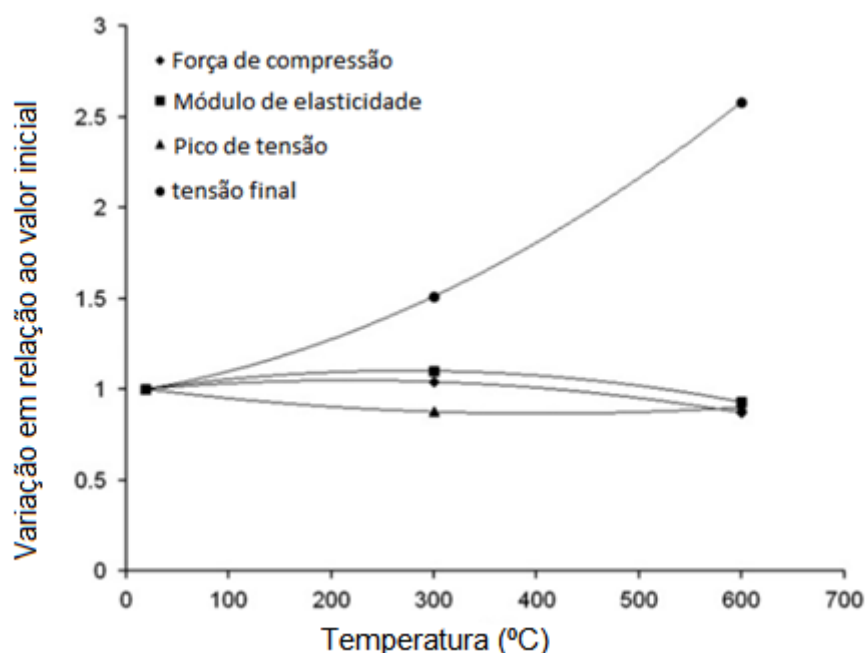


Figura 11 - Gráfico de parâmetros paredes de alvenaria quando expostos a altas temperaturas

Fonte: (RUSSO; SCIARRETTA, 2013)

Os estudos realizados sobre os efeitos do aumento de temperatura em alvenarias, juntamente com a realização de testes contribuíram para o avanço do combate aos incêndios nas edificações, tendo impacto direto nos códigos e recomendações atuais. É válido ressaltar que embora o EUROCODE 6 conduza o modo de construção seguro, ele não aborda procedimentos de execução após o incêndio, com isso existe a necessidade de abordar essas situações de modo a garantir a preservação não só das construções históricas, como dos empreendimentos futuros.

2.8.Influência de altas temperaturas nas propriedades físicas e mecânicas das pedras

Ao observar os danos causados pelo fogo em alguns tipos de pedra foram obtidos alguns resultados que são descritos a seguir.

O calcário contém óxido de ferro hidratado, com isso, ao atingir temperaturas de 250 °C a 300 °C ocorre uma mudança para uma cor rosa / vermelho- marrom. Ao aumentar a temperatura para 400 °C, a pedra fica mais vermelha. Ao ultrapassar a marca dos

600 °C, ocorre a oxidação do carbonato de cálcio, fazendo com que o material se torne um pó branco (CHAKRABARTI; YATES; LEWRY, 1996).

O arenito tem um comportamento parecido com o calcário, em temperaturas de 250–300 °C tem-se a desidratação dos compostos de ferro, tornando o arenito marrom avermelhado. Acima de 573 °C ocorre a inversão dos cristais de quartzo, causando rachaduras na pedra, tornando o arenito quebradiço. (BIRÓ; HLAVIČKA; LUBLÓY, 2019).

Diferente das rochas já citadas, o granito não apresenta mudança de cor com o aumento da temperatura. É importante ressaltar que o granito, assim como o arenito, sofre com a inversão dos cristais de quartzo, entretanto, caso o aumento de temperatura seja inferior a 5 °C/min é possível reverter a expansão da rocha em temperaturas inferiores a 250 °C, (BIRÓ; HLAVIČKA; LUBLÓY, 2019)

Foi observado uma ruptura completa da estrutura interna do mármore, causada pela expansão diferencial dos cristais de calcita. Essa expansão pode causar reduções significativas na resistência à flexão da pedra, podendo deixar o material tão quebradiço a ponto de se tornar um pó branco (CHAKRABARTI; YATES; LEWRY, 1996).

Para analisar a influência do calor nas propriedades mecânica das pedras é necessária a realização de testes laboratoriais com base nas normas europeias. Para determinar a ação do fogo foram elaborados diversos modelos matemáticos que permitem analisar o comportamento de um incêndio com base na temperatura e o tempo decorrido. Essa metodologia é transcrita nas chamadas curvas de incêndio padrão.

Nos experimentos feitos por Biró; Hlavička; Lublój, 2019, pode-se observar os efeitos das altas temperaturas nas alvenarias de pedra. Os tipos de pedra utilizados foram granito rosa beta, labradorita, travertino e mármore. Nos testes foram utilizadas temperaturas de 50, 150, 300, 500, 800 °C, sendo o tempo de aquecimento de duas horas para todas as amostras. Elas foram resfriadas à temperatura ambiente de 20 °C, e testadas apenas ao final do resfriamento.

Após testes foi realizada uma avaliação visual das pedras, foram observadas mudanças de cor em temperaturas inferiores a 300 °C, além de pequenas rachaduras,

que podem indicar uma mudança na estrutura química da pedra. Os autores fizeram as seguintes observações:

- foram encontradas pequenas rachaduras nas amostras de granito e labradorita a 500 °C e rachaduras adicionais e mais amplas apareceram a 800 °C. Supõe-se que as trincas também afetem de forma negativa os valores de resistência, o que torna questionável a aplicabilidade adicional dessas rochas;
- foi observada a descoloração das amostras de labradorita a 500 °C, provavelmente devido à oxidação de minerais contendo ferro na rocha;
- as amostras de granito expostas a temperaturas acima de 300 °C desbotaram e alguns dos minerais mais escuros provavelmente foram transformados;
- a mudança mais notável do mármore foi que a pedra ficou branca. As amostras perderam completamente o brilho. Os testes de resistência não foram realizados no mesmo dia da carga de calor (somente no dia seguinte); portanto, ocorreram outras alterações nas rochas à base de CaCO_3 carregadas com temperatura de 800 °C (mármore e calcário). No dia seguinte, foi observada uma camada branca em pó que podia ser facilmente triturada à mão, com isso foi difícil determinar as dimensões geométricas para os testes de resistência. A geometria alterada e a massa da peça removida (pó) foram medidas. A parte removida foi de 5,5 m% para o calcário e 3,1 m% para o mármore. Por causa da carga de temperatura, o carbonato de cálcio foi convertido em óxido de cálcio, que reagiu com a umidade do ar e se tornou hidróxido de cálcio (pelo menos uma parte dele). Isso resultou em um aumento de 44% no volume, causando fragmentação da superfície.

Foram realizados testes para determinar a resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos com 60 mm de altura e 50 mm de diâmetro, compostos de granito, labradorita e mármore. As deformações axiais e laterais foram medidas por três transdutores eletrônicos, cujo limite de medição é de 10 mm. A taxa de carregamento foi de 0,01 mm/s. Os valores de referência foram 63,58 MPa para o travertino, 81,34 MPa para o granito, 61,51 MPa para o labradorita e 59,09 MPa para o mármore. O gráfico apresentado na Figura 12 permite observar a variação relativa na resistência à compressão em função das temperaturas utilizadas.

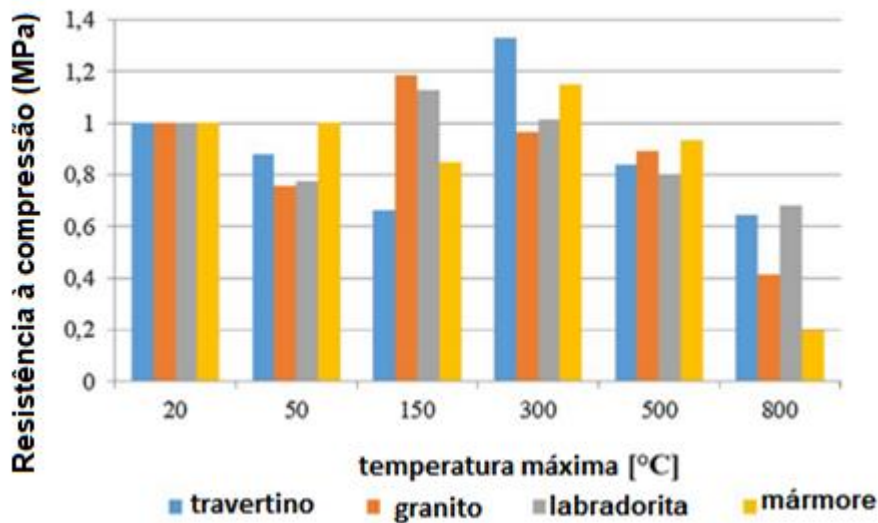


Figura 12 - Variação relativa na força de compressão

Fonte:(BIRÓ; HLAVIČKA; LUBLÓY, 2019)

Os resultados apresentados evidenciam a hipótese gerada pela análise visual relativa aos efeitos das rachaduras nas amostras de granito e mármore expostas a temperaturas entre 500 e 800 °C. O granito manteve aproximadamente 40% de sua resistência à compressão inicial e o mármore aproximadamente 20%, sendo as duas rochas com maior redução de capacidade resistente no experimento.

A resistência à flexão foi medida em primas de 25 × 50 × 150 mm, com uma distância de suporte de 125 mm. A taxa de carregamento foi de 0.5 MPa/s. Os valores de referência foram 4,02 MPa para o travertino, 3,41 MPa para o granito, 4,27 MPa para o labradorita e 4,82 MPa para o mármore. O mármore tinha a maior resistência à flexão inicial, porém as mudanças em sua estrutura interna resultaram na diminuição absoluta mais rápida e mais significativa. A resistência à flexão inicial dos granitos foi menor que a dos mármore, entretanto, de 50 °C a 300 °C o granito obteve o melhor desempenho relativo dos quatro tipos de rochas. Ao alcançar a temperatura de 500 °C o travertino obteve melhores resultados relativos. Em relação às rochas examinadas, o travertino obteve o melhor desempenho geral em resistência à flexão, mantendo aproximadamente 50% do valor inicial a 800 °C. A Figura 13 mostra a resistência a flexão relativa para os quatro tipos de pedras estudados.

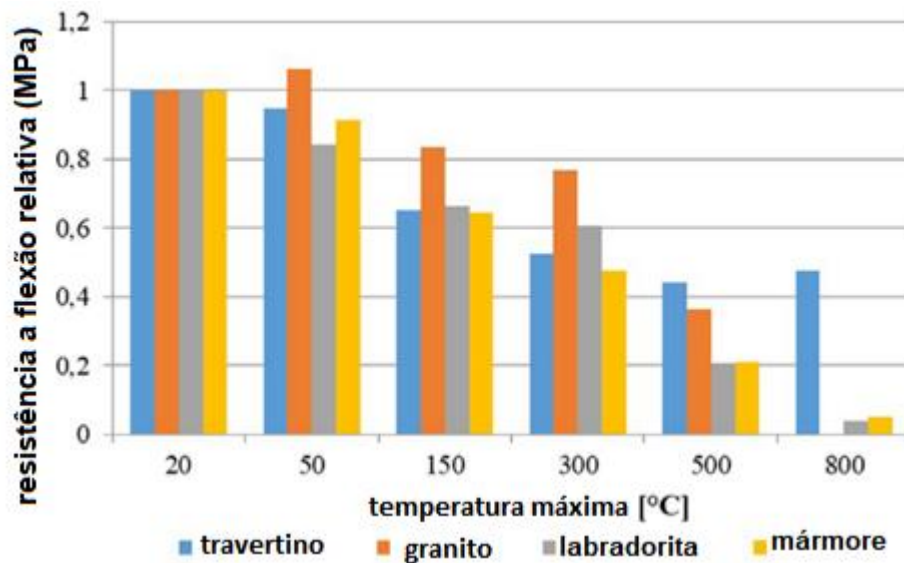


Figura 13 - Resistencia à flexão relativa

Fonte:(BIRÓ; HLAVIČKA; LUBLÓY, 2019)

A resistência à tração foi medida em cilindros de 30 mm de altura e 50 mm de diâmetro. A taxa de carregamento foi de 1 kN/s. Os valores de referência foram 6,02 MPa para o travertino, 10,29 MPa para o granito, 8,32 MPa para o labradorita e 6,79 MPa para o mármore. Os valores residuais relativos foram, em todos os casos, superiores aos medidos durante os testes de resistência à flexão.

2.9.Influência de altas temperaturas nas propriedades mecânicas das argamassas

Ao avaliar os impactos do calor nas argamassas é necessário levar em consideração a composição química do composto, uma vez que ela tem impacto direto nos resultados. Os fatores que influenciam a capacidade resistente da argamassa e do concreto após o aquecimento são definidos principalmente por fatores materiais e ambientais. Fatores materiais incluem agregados e fatores ambientais incluem taxa de aquecimento, duração da exposição à temperatura máxima, taxa de resfriamento, condições de carregamento e umidade (CÜLFIK; ÖZTURAN, 2002).

Estudos realizados sobre a influência de altas temperaturas, no comportamento mecânico das argamassas, mostram que sua resistência à flexão tende a diminuir com o aumento de temperatura.

No estudo feito por Cülfik; Özturan, 2002, foi analisado o efeito causado pelas altas temperaturas em argamassa de elevado desempenho (G0) e com adição de grafite em pó 5% (G5), além do impacto do grau de aumento da temperatura (2 e 8 °C/min) na resistência das argamassas. Os valores das resistências à compressão à temperatura ambiente (20 °C) foram de 62,9 MPa e 44,3 MPa para a amostra com adição. No resultado dos testes em temperaturas inferiores a 300 °C, com taxa de aquecimento de 2 °C/min e tempo de exposição de uma hora, ambas as amostras sofreram perda de resistência à compressão, com a amostra com adição de grafite sofrendo uma porcentagem de redução menor, porém com o valor absoluto inferior, 48,8 MPa contra 37,7 MPa. Mantendo as condições de temperatura e taxa de aquecimento e aumentando o tempo de exposição para dez horas, também houve redução na resistência à compressão, sendo G0 44,7 MPa e G5 39,3 MPa, sendo esse o único resultado em que o valor da resistência sofreu uma redução inferior ao aumentar o tempo de exposição. Em todos outros os testes, as argamassas que foram expostas às mesmas temperaturas, porém com grau de aquecimento maior, obtiveram melhores resultados, independentemente de sua composição.

A resistência à flexão também foi estudada, e os resultados obtidos foram semelhantes aos de resistência à compressão. A resistência à flexão diminuiu com o aumento de temperatura, sendo menos impactada com uma taxa de aumento de temperatura maior. A Figura 14 mostra a resistência a flexão de argamassas de elevado desempenho que foram expostas a altas temperaturas.

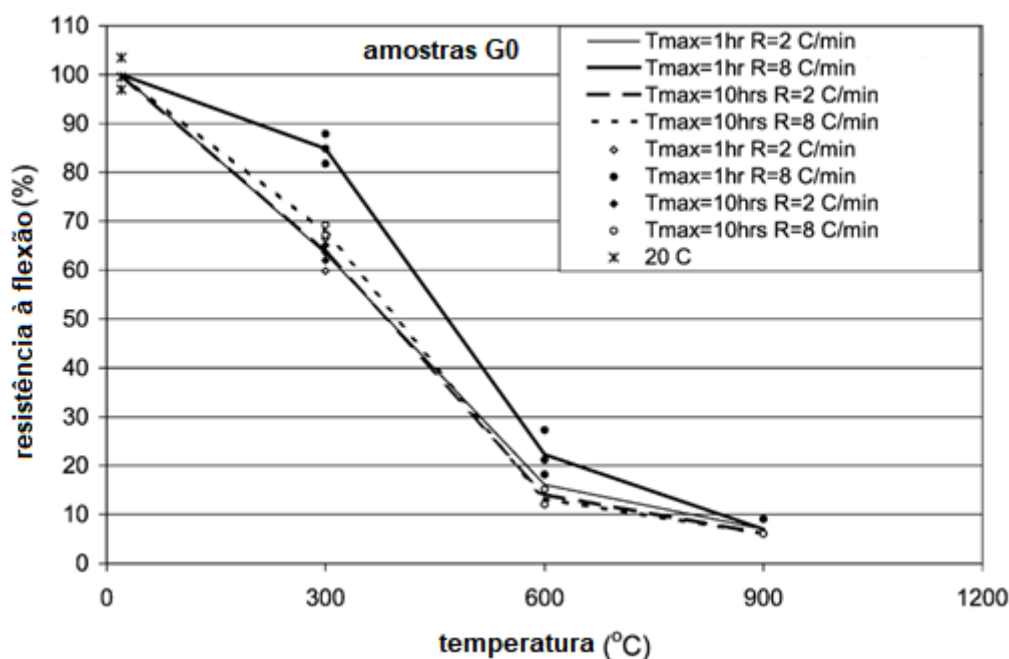


Figura 14 - Resistência à flexão de argamassas de alta performance exposta a altas temperaturas

Fonte : (CÜLFIK; ÖZTURAN, 2002)

O estudo também averiguou o impacto da temperatura no módulo de deformação das argamassas. Amostras G0 expostas a 300 °C mantiveram um máximo de 67 % do módulo de deformação das amostras de controle. Por outro lado, as amostras G5 mantiveram até 97 % do seu módulo estático de deformação inicial a 300 °C. A 600 °C, as amostras G0 mantiveram apenas 10 a 18 % do módulo inicial de deformação. Da mesma forma, as amostras do G5 mantiveram cerca de 18 a 20 % do seu módulo inicial de deformação. Quando as amostras foram expostas a 900 °C, não foi possível medir com precisão o módulo de deformação devido à alta perda de força.

Delhomme; Ambroise; Limam, 2012 estudaram os efeitos causados pela temperatura nas propriedades mecânicas de argamassas a base de cimento Portland (CP) com diferentes adições de Escória Granulada de Alto Forno (EGAF). Os testes de compressão e tração realizados no estudo mostraram um aumento na resistência a compressão conforme Tabela 4 e flexão conforme Tabela 5 das argamassas M20 e M50, expostas a 150 °C e 300 °C.

Tabela 4 - Resistência a à compressão de argamassas de CP com adição de EGAF em diferentes temperaturas

temperatura ° C					
amostra	20	150	300	600	900
M0	36,5	36,3	34,42	20,15	2,93
M20	33	36,92	33,97	21,72	5,03
M50	30,44	42,36	45,18	28,61	5,1
M80	19,55	28,96	25,07	19,06	3,21

* M% de adição de EGAF

Fonte: Delhomme; Ambroise; Limam, 2012

Tabela 5 - Resistência a à tração de argamassas de CP com adição de EGAF em diferentes temperaturas

temperatura ° C					
amostra	20	150	300	600	900
M0	6,3	7,2	5,3	2,2	0,45
M20	6,8	8,1	5,2	2,3	0,65
M50	5,6	7,6	5,3	2,1	0,4
M80	3,1	4,1	2,8	0,9	0,25

* M% de adição de EGAF

Fonte: Delhomme; Ambroise; Limam, 2012

É possível concluir que todas as argamassas com adição de EGAF apresentam uma melhora na resistência à tração quando expostas a temperaturas até 150 °C. Entretanto, independentemente da composição, todas as amostras sofreram redução em sua resistência inicial ao serem expostas a temperaturas de 600 °C (conforme tabela 5). Os resultados do estudo evidenciam o impacto da composição e

temperatura de exposição das argamassas com os efeitos causados nas propriedades mecânicas.

3. Programa experimental: materiais e métodos

Com o objetivo de avaliar a influência da submissão a altas temperaturas no comportamento mecânico e físico de granitos foi desenhada uma campanha experimental de ensaios de compressão uniaxial e de caracterização física em diferentes tipos de granito sujeitos a diferentes níveis de temperaturas e a diferentes condições de resfriamento.

No desenvolvimento do trabalho experimental foram utilizados corpos de provas cúbicos com 7 cm de aresta, compostos de granitos provenientes da região norte de Portugal. A nomenclatura dada aos corpos de prova provém de sua localização e cor, sendo Póvoa de Lanhoso (PLA azul e PLM amarelo), granito de Ponte de Lima (PTA azul e PTM amarelo) e granito de Mondim de Basto (MDB branco e MDM amarelo). Isto significa que para o mesmo tipo de granito, é possível estudar dois diferentes níveis de intemperismo, dado que os granitos amarelos são mais afetados por esse fenômeno e por isso com características físicas diferentes.

Na escolha dos testes realizados, foi levado em consideração o número de cubos de cada tipo de granito, devido ao número variável de corpos de prova, como se pode verificar na Tabela 6.

Tabela 6 - Número de amostras por tipo de granito

Tipo de granito	Número de amostras disponíveis
PLA	7
PLM	23
PTA	13
PTM	23
MDB	20
MDM	9

Para a organização da parte experimental, cada corpo de prova foi etiquetado com o respectivo nome do granito e numeração única conforme ilustra a Figura 15.

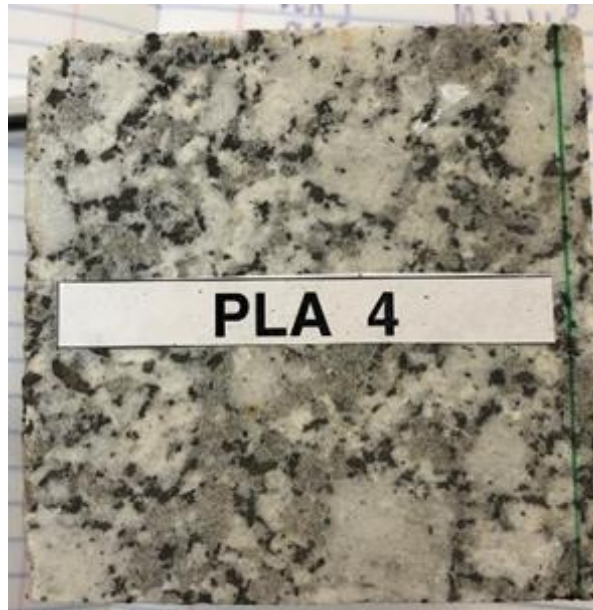


Figura 15 Etiqueta de identificação dos corpos de provas

As normas europeias, utilizadas para realização dos ensaios experimentais:

- Obtenção do coeficiente de absorção por capilaridade - EN 1925:1999 - Métodos de ensaio para pedra natural determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade
- Obtenção da massa volúmica, porosidade aberta e total - EN 1936:2006 - Determinação das massas volúmicas real e aparentes das porosidades total e aberta); e
- Obtenção do coeficiente de absorção por imersão - EN 13755:2008 Determinação da Absorção de água por pressão atmosférica
- Obtenção da resistência à compressão uniaxial - EN 1926:2006 - Determinação da resistência à compressão.

3.1.Absorção de água por capilaridade

Seguindo as recomendações da norma portuguesa EN 1925:1999, foi possível determinar os coeficientes de absorção de água por capilaridade de todos os seis tipos de granitos analisados. A norma EN 1925:1999 exige aparelhos e utensílios para a realização do teste, dentre eles: um recipiente plano com suportes não absorventes,

capaz de manter o nível de água, e alguns aparelhos para medições: um cronômetro com resolução de 1 segundo; uma balança com precisão de 0,01 g; e uma régua graduada.

Foram utilizados seis corpos de prova de cada tipo de granito, na direção paralela ao plano de mais fácil desmonte na pedreira (VASCONCELOS, 2005). As dimensões dos corpos de prova atenderam às dimensões exigidas pela norma, (70 ± 5) mm de aresta. Antes da realização dos ensaios, os corpos de prova foram secos em estufa. Para este efeito, foram colocados em uma estufa à temperatura de $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ por um período de 24 horas, sendo necessário que a diferença de massa entre duas pesagens consecutivas após um intervalo de 24h, fosse inferior a 0,1%. Ao ser garantida a condição de massa constante, os corpos de prova foram pesados e foi anotada a massa seca (m_d) e a área da base a ser imersa foi calculada (m^2). Foi marcado na lateral dos corpos de prova uma altura de 3 mm (conforme ilustrado na Figura 16), de modo a definir a espessura de água de imersão. Os corpos de prova foram apoiados por canudos cortados de acordo com a dimensão do cubo e colocados sob os corpos de prova, assegurando a utilização de um material não absorvente e a absorção adequada de água pela base, ver Figura 17.



Figura 16 - Linha de imersão dos corpos de prova



Figura 17 - Apoio dos corpos de prova

Foi colocada água até a altura determinada pela linha de imersão e iniciado o cronômetro, de modo a marcar os tempos de medição da massa dos corpos de prova. Foram iniciados tempos mais curtos que foram progressivamente aumentados. É importante ressaltar que a norma EN 1925:1999 sugere que para rochas pouco absorventes sejam utilizados os tempos de 30, 60, 180, 480, 1440, 2880 e 4320

minutos para controle da massa e assim da água absorvida. Porém, após a realização de alguns testes experimentais, e devido ao horário reduzido de funcionamento do laboratório em função das restrições causadas pela pandemia, foram utilizadas diferentes marcações de tempo, tentando se aproximar ao máximo dos tempos sugeridos pela norma e não deixando de cumprir as exigências do número mínimo de pesagens (7), apenas finalizando o ensaio quando a diferença entre duas pesagens consecutivas não era superior a 1 %.

Nas determinadas marcações de tempo, foram realizadas pesagens, onde foi retirada a água em excesso da base dos corpos de prova por meio de um pano seco. Ao fim de todas as pesagens foi elaborado um gráfico, onde se representa a quantidade de água absorvida por unidade de área (g/m^2) em função da raiz quadrada do tempo em segundos. O coeficiente de absorção por capilaridade foi calculado pelos 5 pontos da reta de regressão linear. A absorção de água por unidade de área foi calculada através da fórmula:

$$Ab = \left(\frac{m_f - m_d}{A} \right) \quad (2)$$

Onde,

M_f é a massa final do corpo de prova (g)

M_d é a massa seca (g)

A é a área a base do corpo de prova (m^2)

Ab é a quantidade de água absorvida (g/m^2)

3.2. Absorção de água por imersão

Para a determinação do coeficiente de absorção de água por imersão à pressão atmosférica, foi utilizada a norma EN 13755:2008. Todos os corpos de prova passaram pelo processo de secagem até atingirem a massa constante, sendo deixados por um período de 24 horas em uma estufa a 70 °C (ver Figura 18). Ao atingirem uma diferença entre pesagens inferior a 0,1 %, em uma balança com precisão de 0,1 g, os corpos de prova foram retirados na estufa. Após ser mantido em um exsiccador para atingir a temperatura de 20 +- 5 °C, o corpo de prova estava pronto para o ensaio.



Figura 18 – Corpos de prova na estufa

Os corpos de prova foram colocados em um recipiente para imersão completa. Foi colocada água até a metade de sua altura, após 60 minutos foi adicionada água até $\frac{3}{4}$ de sua altura e após 120 minutos, os corpos de prova foram completamente imersos sendo o nível da água 25 ± 5 mm acima do topo do corpo de prova. Passadas 48 h, os cubos foram retirados da água, foi retirado o excesso de água com um pano e realizada a pesagem. Após esse processo, os corpos de prova foram recolocados na água de modo a continuar o ensaio. Foram realizadas pesagens (ver Figura 19) seguindo o mesmo procedimento em intervalos de 24 h, até que a diferença entre duas pesagens consecutivas fosse inferior a 0,1%. O resultado da última pesagem consiste no valor da massa saturada do corpo de prova (m_s). O valor da absorção de água por imersão à pressão atmosférica (A_b) foi calculado pela razão entre a diferença entre a massa saturada e a massa seca, m_d , e a massa seca (m_d), conforme a equação (3):

$$A_b = \frac{m_s - m_d}{m_d} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

M_s é a massa saturada

M_d é a massa seca

A_b é o valor da absorção de água por pressão atmosférica

Fonte: O autor, 2020

3.3. Massa volúmica aparente e porosidade aberta

Os ensaios para determinação da massa volúmica e porosidade aberta foram realizados conforme a EN 1936:2006 - Determinação das massas volúmicas real e aparentes das porosidades total e aberta. Antes do ensaio, todos os corpos de prova passaram pelo processo de secagem até atingirem a massa constante (m_d), conforme descrito nos tópicos 3.1 e 3.2, sendo pesados em uma balança com precisão de 0,01 g. Os corpos de prova foram colocados em um picnômetro onde a pressão foi reduzida gradualmente para 15+- 2 mm Hg para simulação de vácuo, sendo mantida por um período de 2h, de modo a abrir os poros dos cubos. Passado esse período, foi adicionada água de forma gradual, de forma a que os corpos de prova ficassem completamente imersos após 15 minutos, sendo deixados por 24h completamente imersos com pressão atmosférica. Após a finalização dessa etapa, foi utilizada uma balança hidrostática (Figura 19) para medir a massa do corpo de prova imerso em água massa submersa (m_h). Posteriormente, após a retirada do excesso de água com um pano, foi obtida a massa saturada (m_s).



Figura 19 - Pesagem hidrostática

O cálculo da porosidade aberta(p_0) é feito pela seguinte fórmula (4):

$$p_0 = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

M_s é a massa do corpo de prova saturado

M_d é a massa do corpo de prova seco

M_h é a massa do corpo de prova imerso – massa hidrostática

p_0 é a porosidade aberta

A massa volúmica aparente é calculada pela seguinte fórmula (5):

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times 998 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (5)$$

Onde:

M_s é a massa do corpo de prova saturado

M_d é a massa do corpo de prova seco

M_h é a massa do corpo de prova submerso – massa hidrostática

ρ_b é a massa volumétrica aparente

3.4. Ensaios de compressão uniaxial após a submissão a altas temperaturas

Para a determinação do comportamento dos granitos à compressão uniaxial foi utilizada a norma EN 1926:2006 - Determinação da resistência à compressão como base para a realização dos ensaios de compressão. Os corpos de prova foram expostos a diferentes níveis de temperatura: (a) os corpos de prova de referência foram colocados à temperatura do ambiente de laboratório, de aproximadamente 20 °C; (b) parte dos corpos de prova foi submetida à temperatura de 400 °C e (c) parte dos corpos de prova foi submetida à temperatura de 800 °C. Para o resfriamento dos corpos de prova sujeitos a altas temperaturas (400 °C e 800 °C) foram considerados

dois processos: (a) resfriamento brusco (mergulhados em água); (b) resfriamento gradual à temperatura ambiente. Pretende-se avaliar o efeito das condições de resfriamento na resistência à compressão dos granitos. Como o número de corpos de prova varia por tipo de granito, foi realizado o maior número de teste possíveis de acordo com a disponibilidade de cada granito. A distribuição foi feita conforme a Tabela 7. O efeito do resfriamento brusco foi apenas avaliado no granito PLM, PTM e MDB. Os patamares de temperatura foram determinados após análise de estudos realizados em granitos, citados no Capítulo 2. Como o número de amostras disponíveis era limitado, foram escolhidos os patamares onde seria possível evidenciar maiores mudanças nos granitos. Com isso, esperava-se que o patamar de 400 °C permitisse evidenciar mudança na resistência a compressão e possivelmente mudanças de cor. O patamar de 800 °C foi escolhido pelo grande impacto gerado nos blocos estudados por outros autores, danificando severamente os granitos expostos a essa temperatura. Além disso, tem-se como objetivo estudar o efeito dos diferentes modos de arrefecimento para o mesmo patamar de temperatura.

Tabela 7 - Distribuição de granitos por patamar de temperatura/ resfriamento

Tipo de granito	20 °C	400 °C	800 °C	400 °C resfriamento brusco	800 °C resfriamento brusco
PLA	3	-	4	-	-
PLM	5	5	5	4	4
PTA	4	4	5	-	-
PTM	5	5	5	4	4
MDB	5	5	5	-	5
MDM	4	-	5	-	-

Para a exposição dos granitos a altas temperaturas, foi utilizado um forno para o aquecimento dos corpos de prova. Foi utilizada uma taxa de aquecimento de 5 °C /min, até o corpos de prova atingirem a temperatura desejada, sendo depois a c. Para o controle da temperatura no interior dos corpos de prova foram introduzidos sensores

de temperatura num corpo de prova de referência (Figura 20). As curvas de aquecimento para 400°C e 800°C relativas aos corpos de prova de controle estão na Figura 21 e Figura 22. A primeira parte da curva de 400 °C teve duração de 1h e 20 minutos, enquanto na curva de 800 °C a duração foi de 2h e 40 min, em ambas as curvas o patamar teve duração de 2h. Verifica-se que a temperatura é uniforme em todos os corpos de prova.



Figura 20 - Blocos dentro do forno, pré-aquecimento

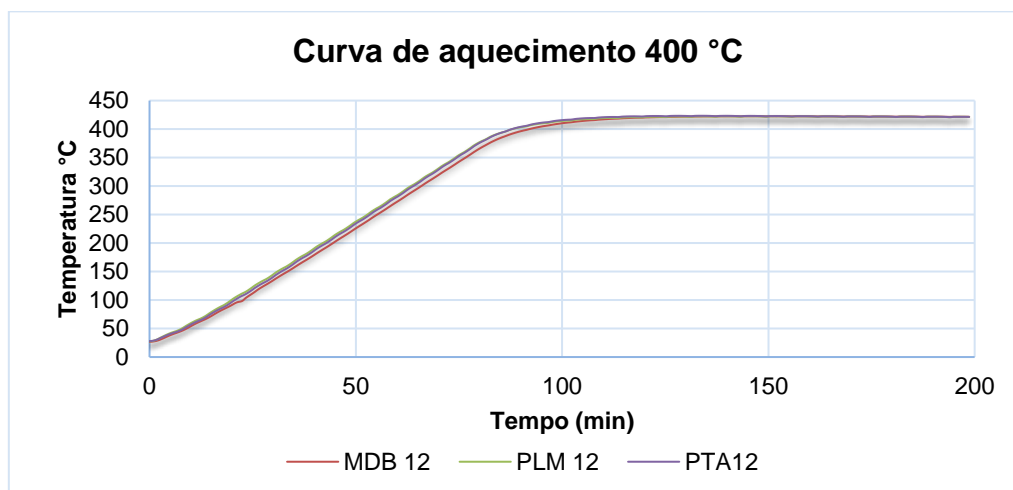


Figura 21 - Curva de aquecimento 400 °C

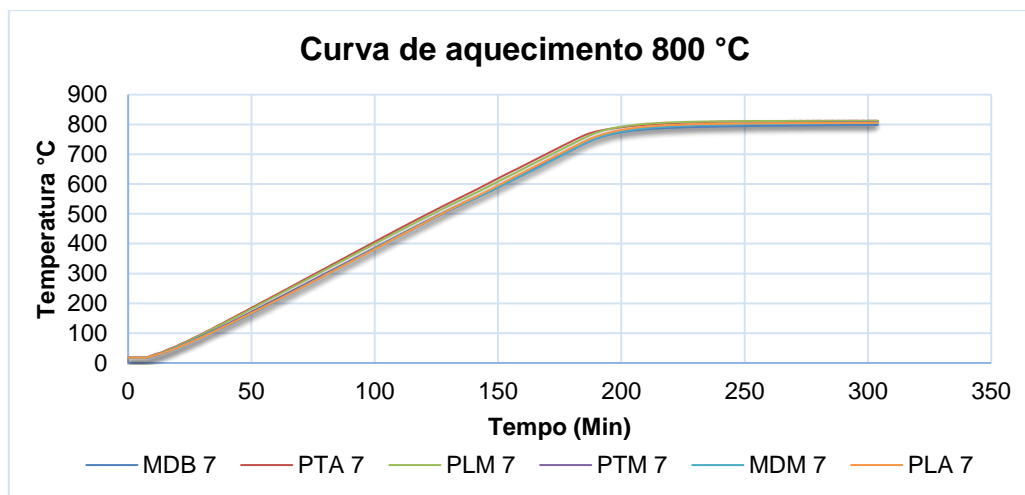


Figura 22 - Curva de aquecimento 800 °C

Após o aquecimento, os blocos foram resfriados de forma brusca em baldes com água, conforme ilustra a Figura 23, por um período de 20 minutos, sendo constantemente adicionada mais água para resfriamento. Os corpos de prova que foram resfriados de forma natural ficaram dentro do forno com a porta aberta até atingirem a temperatura ambiente (Figura 24).



Figura 23 - Corpos de prova em resfriamento brusco

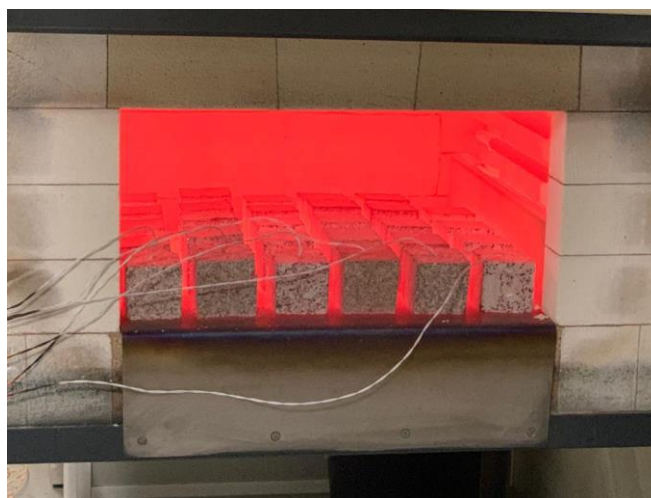


Figura 24 - Blocos pós aquecimento a 800 °C

Para os ensaios de compressão uniaxial foram utilizados dois LVDTs (Transdutores Lineares de Deslocamento) para medição dos deslocamentos, posicionados em lados opostos da prensa, e utilizado o valor médio entre os dois no cálculo do módulo de deformação, que foi calculado pelo gráfico tensão x deformação. A aplicação de carga foi aplicada numa prensa hidráulica com capacidade de 3000 kN, com uma aplicação

de carga uniforme de 13 kN/s. A Figura 25 mostra a o posicionamento do corpo de prova na prensa e o posicionamento de um dos LVDT's, o outro transdutor se encontra no lado oposto da presa, posicionado de forma semelhante.



Figura 25 - Bloco na prensa com LVDT

4. Resultados experimentais: apresentação e discussão

Neste capítulo aprestam-se os principais resultados de caracterização física e mecânica realizados nos corpos de prova de granito submetidos a altas temperaturas. Dos ensaios experimentais foi possível obter uma visão geral das características físicas e mecânicas dos blocos de granito. Foi possível ainda avaliar o impacto que o modo de resfriamento teve na resistência à compressão do granito e módulo de deformação, podendo melhorá-la ou destruir completamente o bloco. É possível correlacionar os resultados dos ensaios de porosidade com a absorção de água do granito.

4.1. Resultados de absorção de água por capilaridade

Como anteriormente foi referido os ensaios de absorção de água por capilaridade foram realizados seguindo as recomendações da norma EN 1925:1999. Nas tabelas 8 a 13 apresentam-se os resultados obtidos por tipo de granito ensaiado.

A partir da análise dos resultados, pode-se verificar que o granito MDM apresentou o valor médio de absorção de água por capilaridade mais elevado ($27,07 \text{ g/m}^2/\text{s}^{0,5}$), seguido pelo MDB ($21,12 \text{ g/m}^2/\text{s}^{0,5}$) e, posteriormente, pelo granito PTM ($16,08 \text{ g/m}^2/\text{s}^{0,5}$). O PLM apresentou a menor absorção por capilaridade ($1,67 \text{ g/m}^2/\text{s}^{0,5}$), a segunda menor taxa foi a do PLA, ($1,89 \text{ g/m}^2/\text{s}^{0,5}$), seguido pelo PTA com ($2,37 \text{ g/m}^2/\text{s}^{0,5}$). As figuras 26 a 31 contém os gráficos de absorção de água por capilaridade de todos os granitos estudados. Este resultado está dentro do esperado dado o nível de meteorização revelado pela cor amarela destes granitos em relação aos outros granitos estudados. Os valores de r^2 foram calculados pelo Excel, juntamente com a equação da reta de regressão linear, com base nos 5 pontos iniciais.

Tabela 8 - Coeficiente de absorção por capilaridade PTM

Identificação	R²	Coeficiente de absorção (g/m²/s^{0,5})
PTM 23	1,00	15,81
PTM 22	1,00	20,09
PTM 21	0,99	18,72
PTM 20	0,94	12,42
PTM 19	0,99	16,97
PTM 16	0,95	12,44
MÉDIA	0,98	16,08
Desvio padrão	0,03	3,18
Coeficiente de variação	0,03	0,20

Tabela 9 - Coeficiente de absorção por capilaridade MDB

Identificação	R²	Coeficiente de absorção (g/m²/s^{0,5})
MDB 1	1,00	19,12
MDB 2	0,98	25,12
MDB 3	1,00	5,86
MDB 4	1,00	30,38
MDB 5	1,00	16,97
MDB 6	1,00	29,25
MÉDIA	1,00	21,12
Desvio padrão	0,01	9,19
Coeficiente de variação	0,01	0,44

Tabela 10 - Coeficiente de absorção por capilaridade PLA

Identificação	R²	Coeficiente de absorção (g/m²/s^{0,5})
PLA 1*	0,99	2,07
PLA 2*	0,98	1,42
PLA 3*	1,00	1,97
PLA 4*	1,00	1,91
PLA 5*	1,00	2,08
PLA 6*	0,99	1,90
MÉDIA	1,00	1,89
Desvio padrão	0,01	0,24
Coeficiente de variação	0,01	0,13

Tabela 11 - Coeficiente de absorção por capilaridade PTA

Identificação	R²	Coeficiente de absorção (g/m²/s^{0,5})
PTA 1	0,98	2,33
PTA 2	0,98	2,30
PTA 3	1,00	2,08
PTA 4	0,97	2,49
PTA 5	0,98	2,41
PTA 6	0,98	2,64
MÉDIA	0,98	2,37
Desvio padrão	0,01	0,19
Coeficiente de variação	0,01	0,08

Tabela 12 - Coeficiente de absorção por capilaridade PLM

Identificação	R²	Coeficiente de absorção (g/m²/s^{0,5})
PLM 1*	1,00	2,51
PLM 2*	1,00	1,98
PLM 3*	0,99	1,92
PLM 4*	0,87	0,38
PLM 5*	1,00	1,76
PLM 6*	1,00	1,45
MÉDIA	0,98	1,67
Desvio padrão	0,05	0,72
Coeficiente de variação	0,05	0,43

Tabela 13 - Coeficiente de absorção por capilaridade MDM

Identificação	R²	Coeficiente de absorção (g/m²/s^{0,5})
MDM 1	0,95	30,68
MDM 2	0,94	31,12
MDM 3	0,95	30,71
MDM 4	0,96	32,44
MDM 5	0,64	12,18
MDM 6	0,81	25,23
MÉDIA	0,88	27,06
Desvio padrão	0,13	7,70
Coeficiente de variação	0,15	0,28

* Nos primeiros resultados obtidos nos blocos PLM e PLA, foram encontrados resultados fora do esperado, com isso, o ensaio foi refeito em dois novos planos de anisotropia.

Os gráficos que relacionam a absorção de água com a raiz quadrada do tempo para os diferentes tipos de granito são apresentados desde a Figura 26 à Figura 31. Os

granitos PTM, MDM e MDB apresentam uma curva típica de absorção por capilaridade composta por um ramo ascendente linear seguido de um patamar correspondente à saturação do granito e à incapacidade de absorver mais água. Curvas deste tipo indicam que o material apresenta uma estrutura de poros uniforme. As curvas obtidas para os granitos PLA, PLM e PTA apresentam uma forma mais atípica, o que poderá ser explicada por uma estrutura porosa mais complexa.

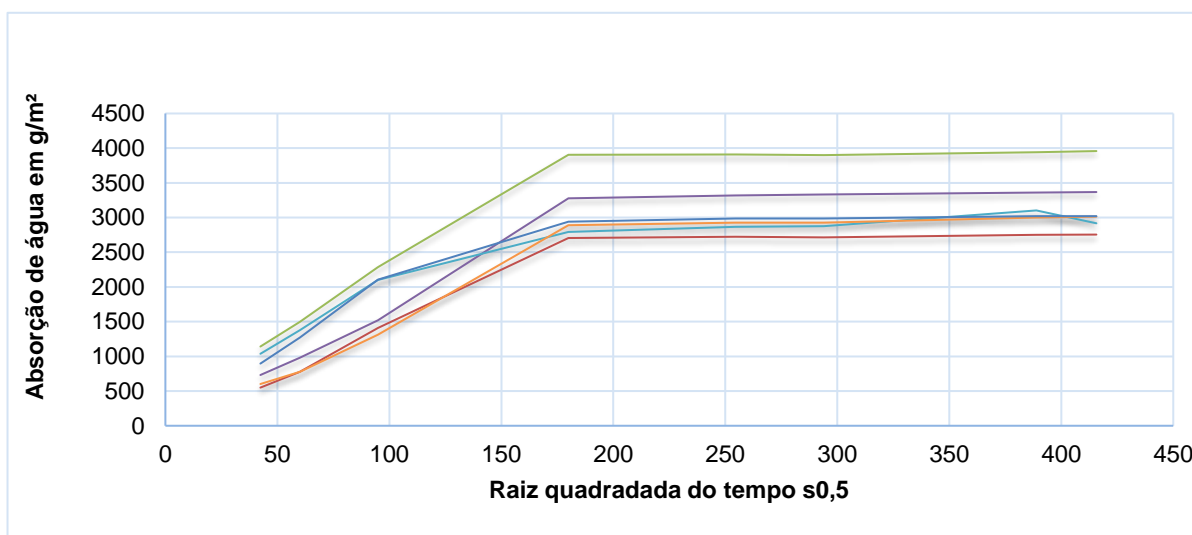


Figura 26 - Gráfico absorção por capilaridade PTM

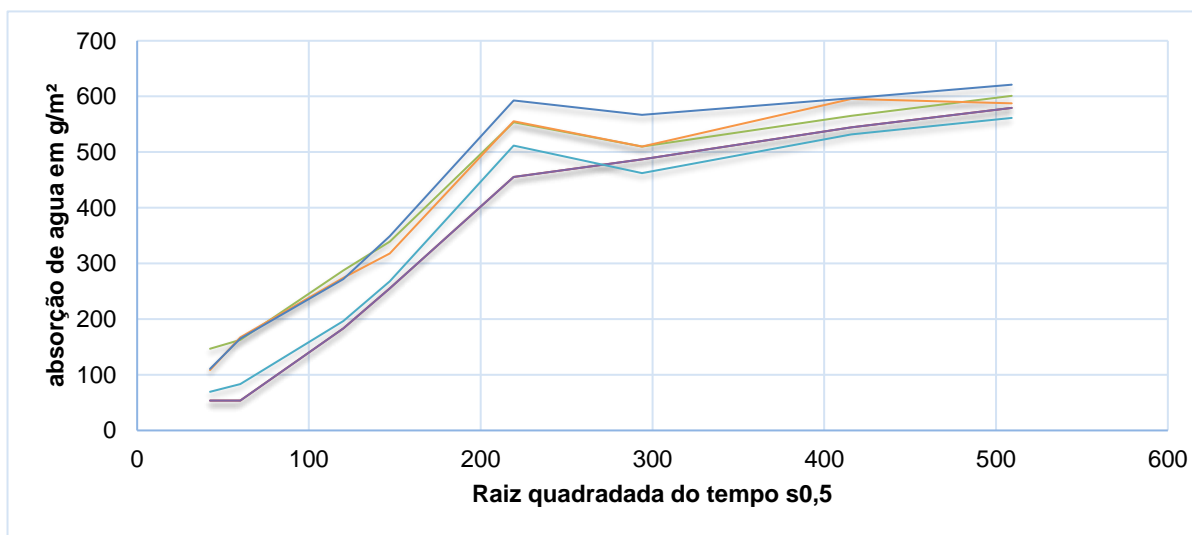


Figura 27 - Gráfico absorção por capilaridade PTA

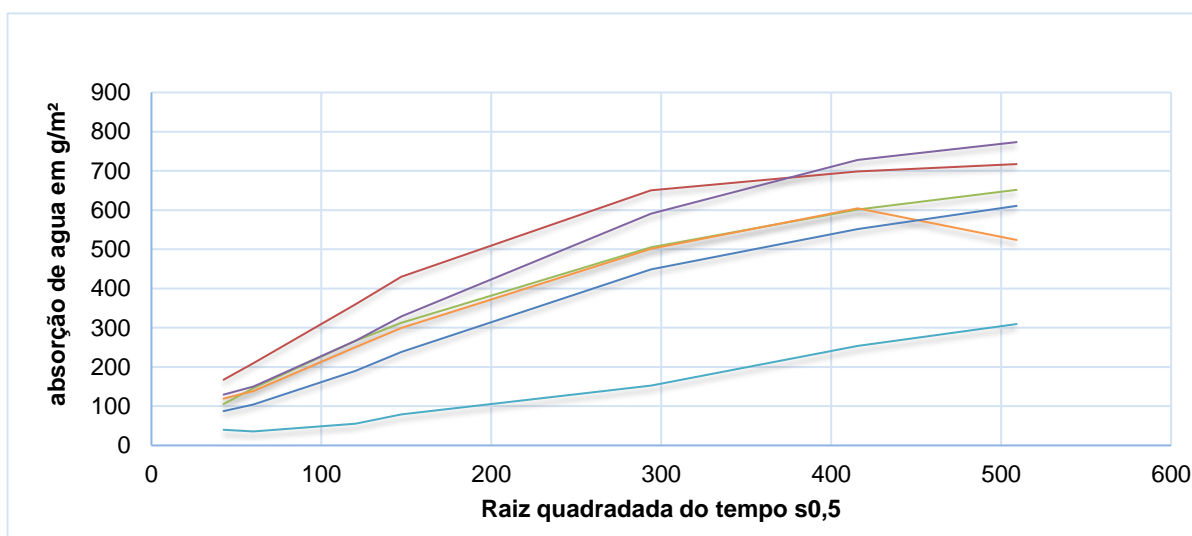


Figura 28 - Gráfico absorção por capilaridade PLM

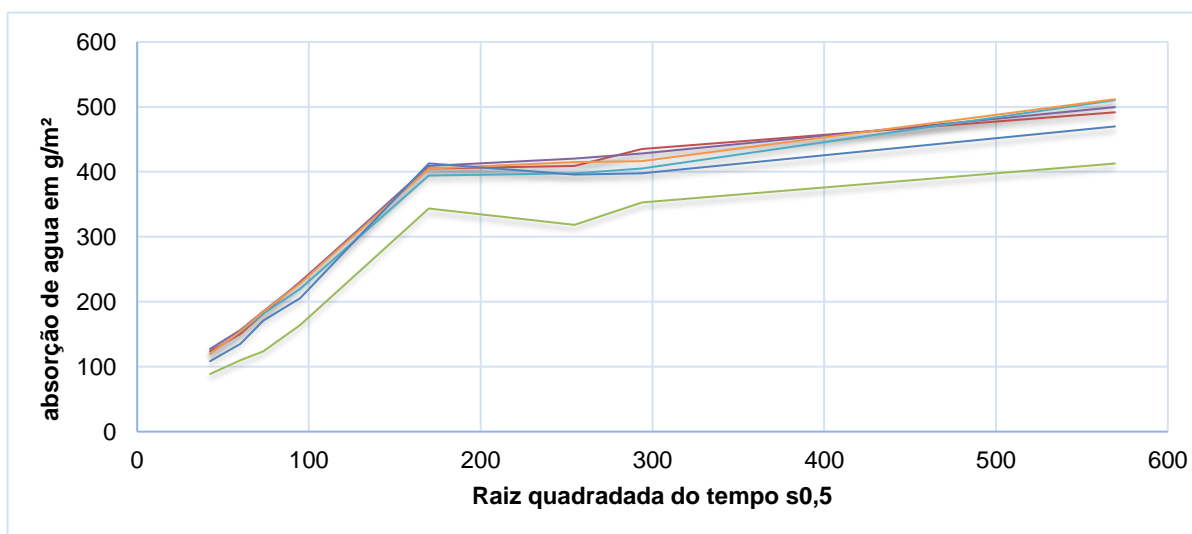


Figura 29 - Gráfico absorção por capilaridade PLA

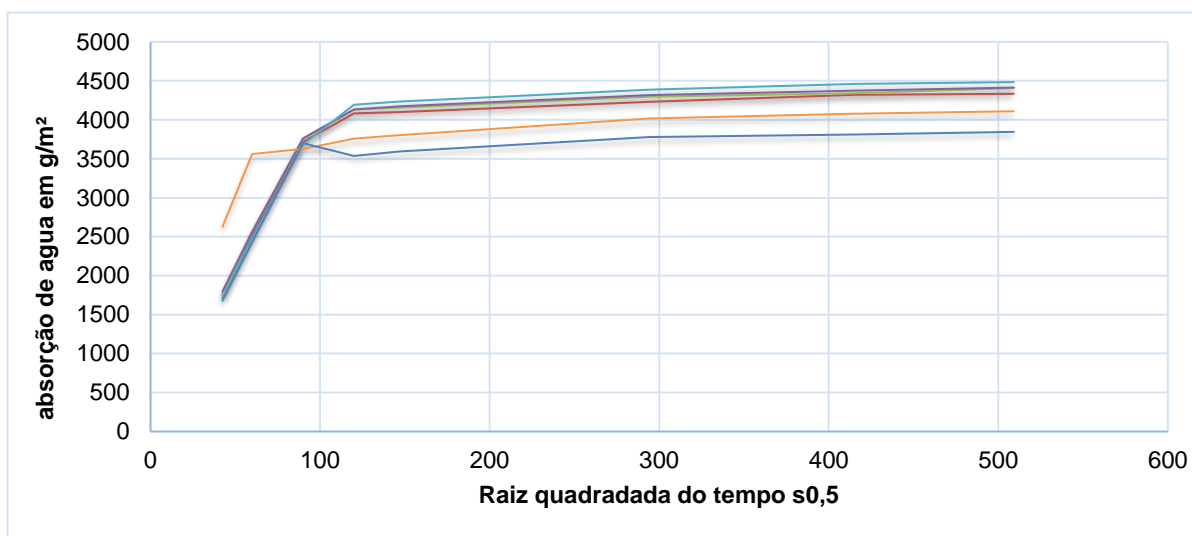


Figura 30 - Gráfico absorção por capilaridade MDM

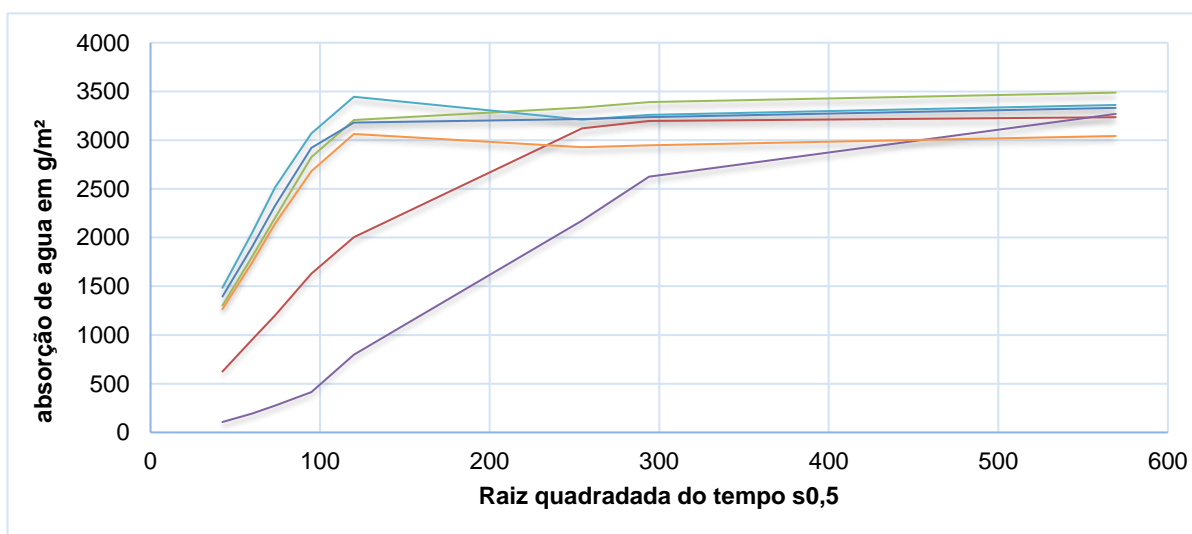


Figura 31 - Gráfico absorção por capilaridade MDB

Os resultados do coeficiente de absorção por capilaridade apresentados nas tabelas 8 a 13 e nas figuras 26 a 31 foram considerados satisfatórios, quando comparados aos resultados encontrados em um estudo prévio realizado por (RIBEIRO, 2013). Os resultados dos granitos PLA e PLM foram repetidos e foi considerada uma outra

direção para a absorção por capilaridade, a direção perpendicular à direção considerada anteriormente. Os resultados são apresentados nas Tabelas 14 e 15

Tabela 14 - Coeficiente de absorção por capilaridade PLA Perpendicular

Identificação	R ²	Coeficiente de absorção (g/m ² /s ^{0,5})
PLA 1	0,99	1,88
PLA 2	1,00	1,65
PLA 3	0,99	1,67
PLA 4	1,00	1,82
PLA 5	1,00	1,78
PLA 6	1,00	1,72
MÉDIA	0,99	1,75
Desvio padrão	0,00	0,09
Coeficiente de variação	0,00	0,05

Tabela 15 - Coeficiente de absorção por capilaridade PLM Perpendicular

Identificação	R ²	Coeficiente de absorção (g/m ² /s ^{0,5})
PLM 1	0,99	2,52
PLM 2	1,00	2,14
PLM 3	0,99	1,77
PLM 4	0,77	0,20
PLM 5	1,00	2,02
PLM 6	0,99	1,81
MÉDIA	0,96	1,74
Desvio padrão	0,09	0,80
Coeficiente de variação	0,09	0,46

As Figuras 32 e 33 apresentam os coeficientes de absorção de água dos granitos PLA e PLM na direção perpendicular em relação a direção de rompimento.

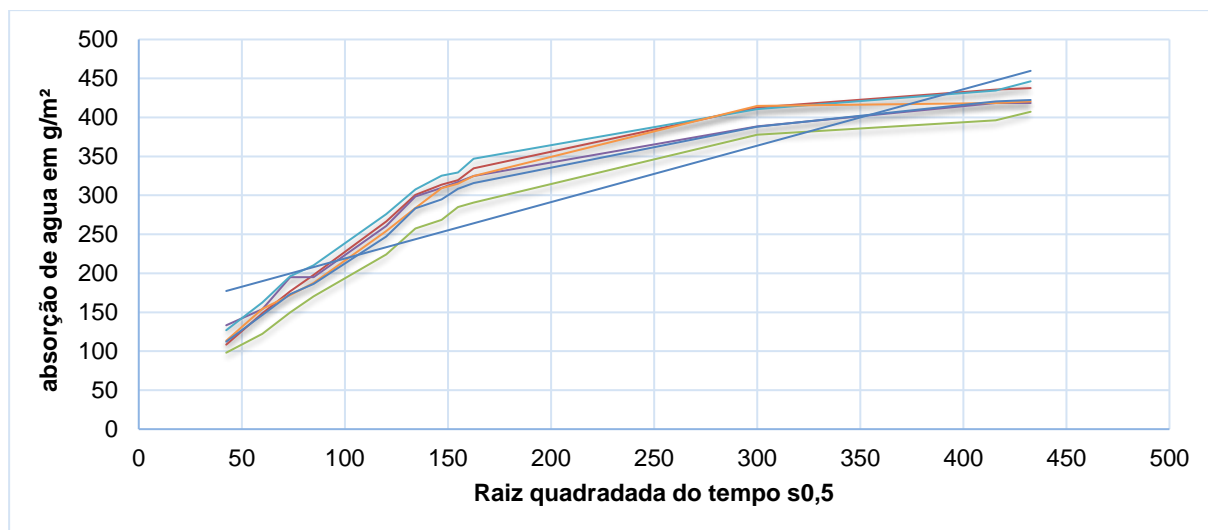


Figura 32 - Gráfico Absorção por capilaridade PLA Perpendicular

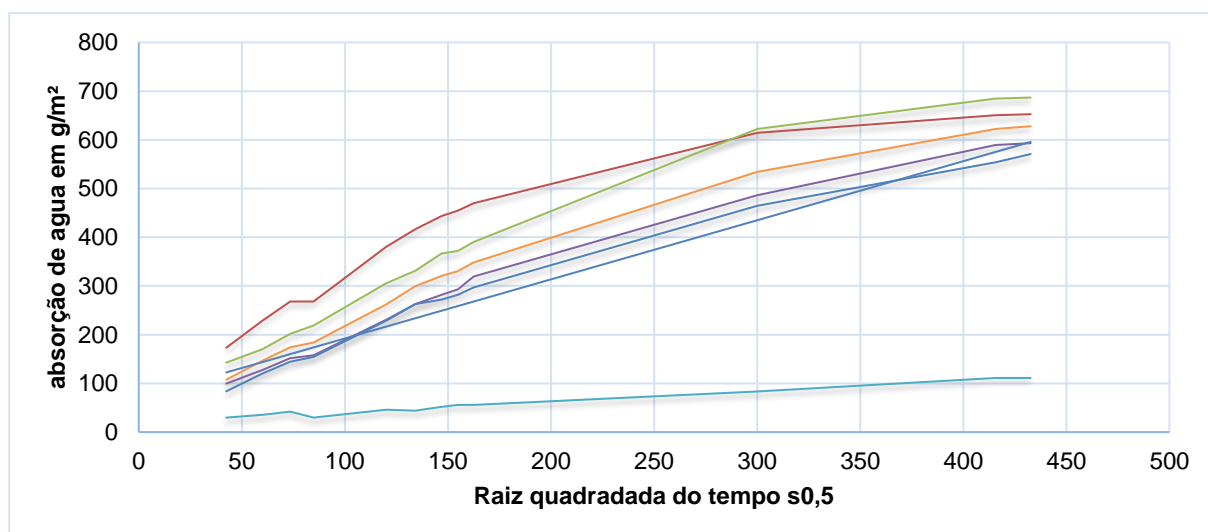


Figura 33 - Gráfico Absorção por capilaridade PLM Perpendicular

Os resultados obtidos para os ensaios paralelos ao eixo de rompimento encontram-se nas tabelas 16 e 17, Figuras 34 e 35.

Tabela 16 - Coeficiente de absorção por capilaridade PLM Paralelo

Identificação	R ²	Coeficiente de absorção (g/m ² /s ^{0,5})
PLM 1	0,90	0,98
PLM 2	0,97	1,15
PLM 3	0,97	1,36
PLM 4	0,34	0,38
PLM 5	0,90	1,29
PLM 6	0,95	1,26
MÉDIA	0,84	1,07
DESVIO PADRÃO	0,25	0,36
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO	0,30	0,34

Tabela 17 - Coeficiente de absorção por capilaridade PLA Paralelo

Identificação	R ²	Coeficiente de absorção (g/m ² /s ^{0,5})
PLA 1	0,99	1,46
PLA 2	0,99	1,06
PLA 3	0,99	1,54
PLA 4	0,99	1,60
PLA 5	0,98	1,62
PLA 6	0,99	1,54
MÉDIA	0,99	1,47
DESVIO PADRÃO	0,01	0,21
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO	0,01	0,14

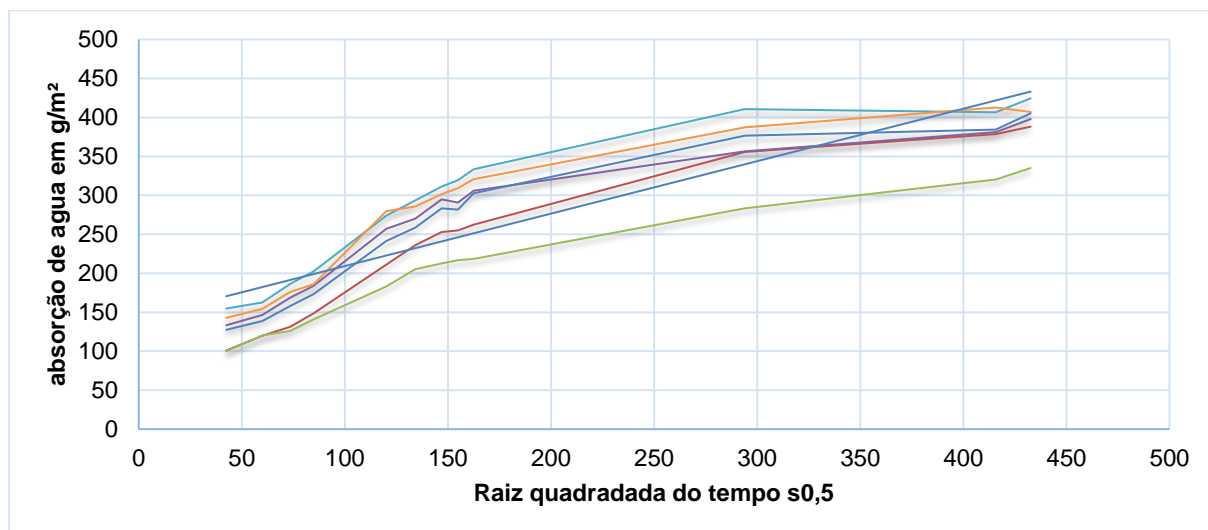


Figura 34 - Gráfico Absorção por capilaridade PLA Paralelo

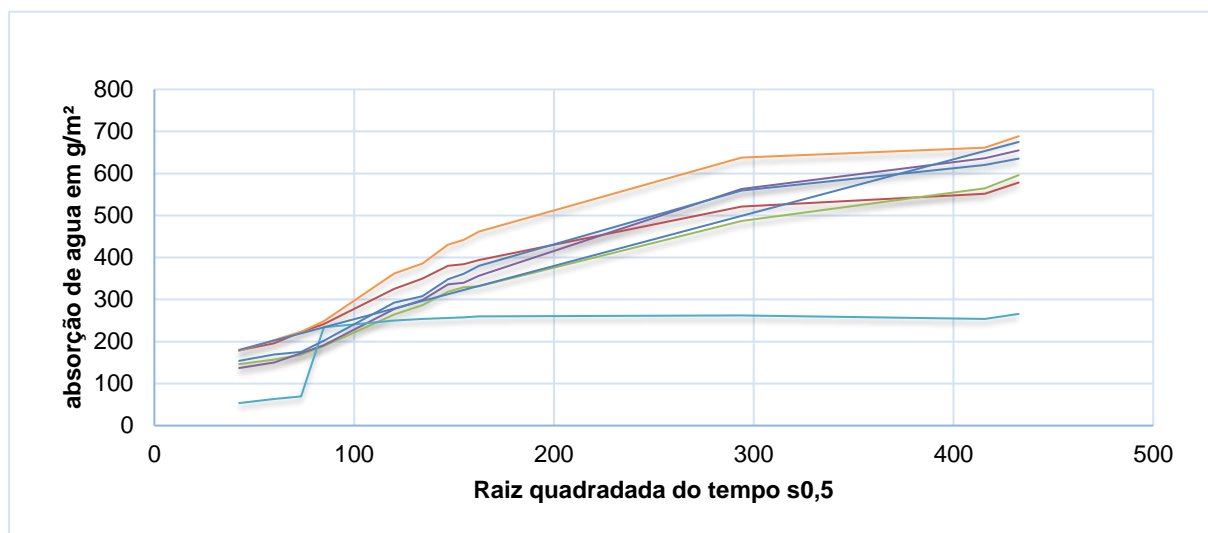


Figura 35 - Gráfico Absorção por capilaridade PLM Paralelo

Em todos os 3 (três) ensaios de absorção realizados, o corpo de prova PLM 4 apresentou resultados muito diferentes dos demais corpos de prova. Pode-se observar que o valor de r^2 em todos os ensaios é bem inferior aos demais blocos. Visualmente não foi possível indentificar anormalidades na estrutura do bloco, é possível que sua estrutura interior estivesse danificada.

4.2. Resultados de absorção de água por imersão

Os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão realizados de acordo com a norma EN 13755 encontram-se apresentados nas tabelas 18 a 23.

Tabela 18 - Coeficiente de absorção de água por pressão atmosférica MDM

Corpo de prova	Md (g)	Ms (g)	Absorção de água (%)
MDM 1	929,77	952,61	2,46
MDM 2	938,35	961,95	2,52
MDM 3	942,71	965,96	2,47
MDM 4	941,00	964,35	2,48
MDM 5	868,23	889,57	2,46
MDM 6	870,72	890,87	2,31
Média			2,45
Desvio padrão			0,07
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO			0,03

Tabela 19 - Coeficiente de absorção de água por pressão atmosférica PTM

Corpo de prova	Md (g)	Ms (g)	Absorção de água (%)
PTM 23	988,23	1004,14	1,61
PTM 22	984,86	1008,09	2,36
PTM 21	980,90	1001,05	2,05
PTM 20	986,59	1002,78	1,64
PTM 19	977,31	994,11	1,72
PTM 16	988,52	1005,29	1,70
Média			1,85
Desvio padrão			0,30
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO			0,16

Tabela 20 - Coeficiente de absorção de água por pressão atmosférica PLA

Corpo de prova	Md (g)	Ms (g)	Absorção de água (%)
PLA 1	1034,03	1038,29	0,41
PLA 2	1044,07	1048,43	0,42
PLA 3	1035,82	1039,76	0,38
PLA 4	1031,19	1035,33	0,40
PLA 5	1041,21	1045,19	0,38
PLA 6	1031,59	1035,51	0,38
Média			0,40
Desvio padrão			0,02
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO			0,04

Tabela 21 - Coeficiente de absorção de água por pressão atmosférica PTA

Corpo de prova	Md (g)	Ms (g)	Absorção de água (%)
PTA 1	1079,77	1084,69	0,46
PTA 2	1000,08	1004,69	0,46
PTA 3	1014,61	1019,28	0,46
PTA 4	983,38	987,83	0,45
PTA 5	1064,64	1069,70	0,48
PTA 6	1072,53	1077,53	0,47
Média			0,46
Desvio padrão			0,01
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO			0,02

Tabela 22 - Coeficiente de absorção de água por pressão atmosférica MDB

Corpo de prova	Md (g)	Ms (g)	Absorção de água (%)
MDB 1	952,68	970,14	1,83
MDB 2	950,62	969,16	1,95
MDB 3	948,57	966,57	1,90
MDB 4	949,49	967,88	1,94
MDB 5	969,92	986,43	1,70
MDB 6	960,28	978,57	1,90
Média			1,87
Desvio padrão			0,09
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO			0,05

Tabela 23 - Coeficiente de absorção de água por pressão atmosférica PLM

Corpo de prova	Md (g)	Ms (g)	Absorção de água (%)
PLM 1	1019,86	1025,50	0,55
PLM 2	993,97	1000,29	0,64
PLM 3	1033,78	1040,18	0,62
PLM 4	1009,07	1014,71	0,56
PLM 5	998,69	1004,89	0,62
PLM 6	1006,95	1012,74	0,58
Média			0,59
Desvio padrão			0,04
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO			0,06

Os valores médios obtidos parecem indicar a mesma tendência dos valores do coeficiente de absorção por capilaridade, sendo mais altos nos corpos de prova MDM, MDB e PTM, quando comparados com os outros granitos, como mostra a Tabela 24.

Bloco	Absorção de água (%)	COEFICIENTE DE VARIACAO
PLA	0,40	0,03
PTA	0,46	0,02
PLM	0,59	0,06
PTM	1,85	0,16
MDB	1,87	0,05
MDM	2,45	0,03

4.3.Resultados massa volúmica e porosidade aberta

Foi utilizada a norma EN 1936:2006 para determinar as massas volúmicas real e aparentes das porosidades total e aberta cujos resultados por tipo de amostras encontram-se apresentados da Tabela 25 a Tabela 29.

Os resultados da porosidade aberta estão de acordo com os valores encontrados nos ensaios de absorção de água por capilaridade. O granito MDM apresenta o maior coeficiente de absorção de água por capilaridade e absorção por imersão e a maior porosidade aberta (5,47%). Os mesmos resultados podem ser observados nos granitos MBD e PTM, que também apresentam valores elevados. A comparação dos resultados de caracterização física pode ser efetuada a partir da Figura 36. Da análise dos resultados conclui-se que uma porosidade aberta maior implica em uma maior absorção de água e maior coeficiente de absorção de água por capilaridade.

Tabela 24 - Massa volúmica aparente e porosidade aberta PTM

	Massa Seca (Md)	Massa Imersa (Mh)	Massa Saturada (Ms)	Massa imersa + balança	Massa vol. aparente (Kg/m3)	Por. Aberta (%)
PTM 1	988,23	610,00	1002,42	1783,00	2513,26	3,62
PTM 2	984,86	606,00	1006,15	1779,00	2456,30	5,32
PTM 3	980,90	604,00	998,83	1777,00	2479,39	4,54
PTM 4	986,59	611,00	1001,36	1784,00	2522,33	3,78
PTM 5	977,31	601,00	992,61	1774,00	2490,63	3,91
PTM 6	988,52	609,00	1003,45	1782,00	2501,06	3,79
MÉDIA	984,40	606,83	1000,80	1779,83	2493,83	4,16
Desvio Padrão					23,95	0,65
Coeficien te de variação					0,01	0,16

Tabela 25 - Massa volúmica aparente e porosidade aberta PTA

	Massa Seca (Md)	Massa Imersa (Mh)	Massa Saturada (Ms)	Massa imersa + balança	Massa vol. aparente (Kg/m3)	Por. Aberta (%)
PTA 1	1079,93	674,00	1083,41	1847,00	2632,50	0,85
PTA 2	999,97	617,00	1003,45	1790,00	2582,40	0,90
PTA 3	1014,77	629,00	1018,41	1802,00	2600,70	0,93
PTA 4	983,87	612,00	986,70	1785,00	2620,50	0,76
PTA 5	1064,84	662,00	1068,07	1835,00	2617,06	0,80
PTA 6	1072,88	669,00	1075,89	1842,00	2631,51	0,74
MÉDIA	1036,04	643,83	1039,32	1816,83	2614,11	0,83
Desvio Padrão					19,37	0,08
C Coeficiente de variação					0,01	0,10

Tabela 26 - Massa volúmica aparente e porosidade aberta PLM

	Massa Seca (Md)	Massa Imersa (Mh)	Massa Saturada (Ms)	Massa imersa + balança	Massa vol. aparente (Kg/m3)	Por. Aberta (%)
PLM 1	1019,87	633,00	1023,65	1810,00	2605,48	0,97
PLM 2	993,95	615,00	998,18	1792,00	2588,76	1,10
PLM 3	1033,69	638,00	1038,21	1815,00	2577,70	1,13
PLM 4	1008,82	626,00	1012,94	1803,00	2601,96	1,06
PLM 5	998,69	617,00	1003,20	1794,00	2580,77	1,17
PLM 6	1006,91	625,00	1010,97	1802,00	2603,56	1,05
MÉDIA	1010,32	625,67	1014,53	1802,67	2593,04	1,08
Desvio Padrão					12,24	0,07
Coeficiente de variação					0,00	0,06

Tabela 27 - Massa volúmica aparente e porosidade aberta PLA

	Massa Seca (Md)	Massa Imersa (Mh)	Massa Saturada (Ms)	Massa imersa + balança	Massa vol. aparente (Kg/m3)	Por. Aberta (%)
PLA 1	1034,09	642,00	1036,65	1819,00	2615,03	0,65
PLA 2	1044,07	648,00	1046,49	1825,00	2614,83	0,61
PLA 3	1035,86	645,00	1038,20	1822,00	2629,17	0,60
PLA 4	1031,24	641,00	1033,66	1818,00	2621,04	0,62
PLA 5	1041,22	647,00	1043,64	1824,00	2619,85	0,61
PLA 6	1031,66	641,00	1034,06	1818,00	2619,44	0,61
MÉDIA	1036,36	644,00	1038,78	1821,00	2619,89	0,61
Desvio Padrão					5,23	0,02
Coeficiente de variação					0,00	0,03

Tabela 28 - Massa volúmica aparente e porosidade aberta MDM

	Massa Seca (Md)	Massa Imersa (Mh)	Massa Saturada (Ms)	Massa imersa + balança	Massa vol. aparente (Kg/m3)	Por. Aberta (%)
MDM 1	929,97	570	951,14	1733	2435,09	5,55
MDM 2	938,55	575	960,4	1738	2430,39	5,67
MDM 3	942,85	578	964,05	1741	2437,42	5,49
MDM 4	941	577	962,78	1740	2434,34	5,65
MDM 5	868,43	532	887,66	1695	2436,86	5,41
MDM 6	870,88	532	888,96	1695	2434,83	5,06
MÉDIA	915,28	560,67	935,83	1723,67	2434,82	5,47
Desvio Padrão					2,48	0,22
Coeficiente de variação					0,00	0,04

Tabela 29 - Massa volúmica aparente e porosidade aberta MDB

	Massa Seca (Md)	Massa Imersa (Mh)	Massa Saturada (Ms)	Massa imersa + balança	Massa vol. aparente (Kg/m3)	Por. Aberta (%)
MDB 1	952,36	578,00	968,32	1760,00	2435,07	4,09
MDB 2	950,20	576,00	967,21	1758,00	2424,02	4,35
MDB 3	948,20	574,00	964,82	1756,00	2421,33	4,25
MDB 4	949,15	575,00	965,91	1757,00	2423,20	4,29
MDB 5	969,60	589,00	984,36	1771,00	2447,54	3,73
MDB 6	959,95	583,00	976,36	1765,00	2435,50	4,17
MÉDIA	954,91	579,17	971,16	1761,17	2431,11	4,15
Desvio Padrão					10,14	0,22
Coeficiente de variação					0,00	0,05

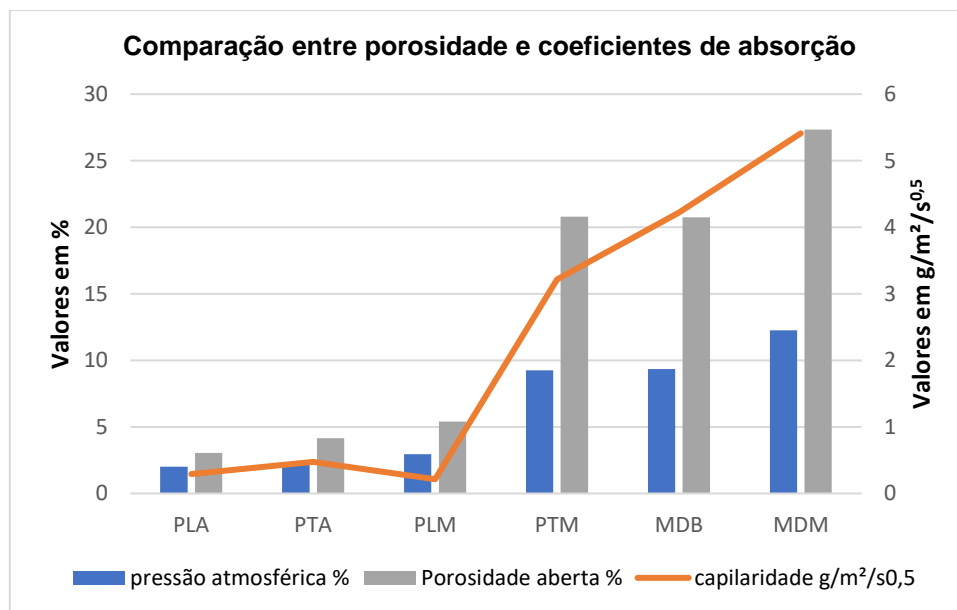


Figura 36 - Comparação entre porosidade e coeficientes de absorção de água por imersão e capilaridade

4.4. Resistência à compressão de granitos sujeitos a elevadas temperaturas

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados de acordo com a norma EN 1926:2006. Os diagramas tensão-deformação para todos os granitos em análise considerando as amostras à temperatura ambiente (20 °C) apresentam-se nas Figuras 37 a 42.

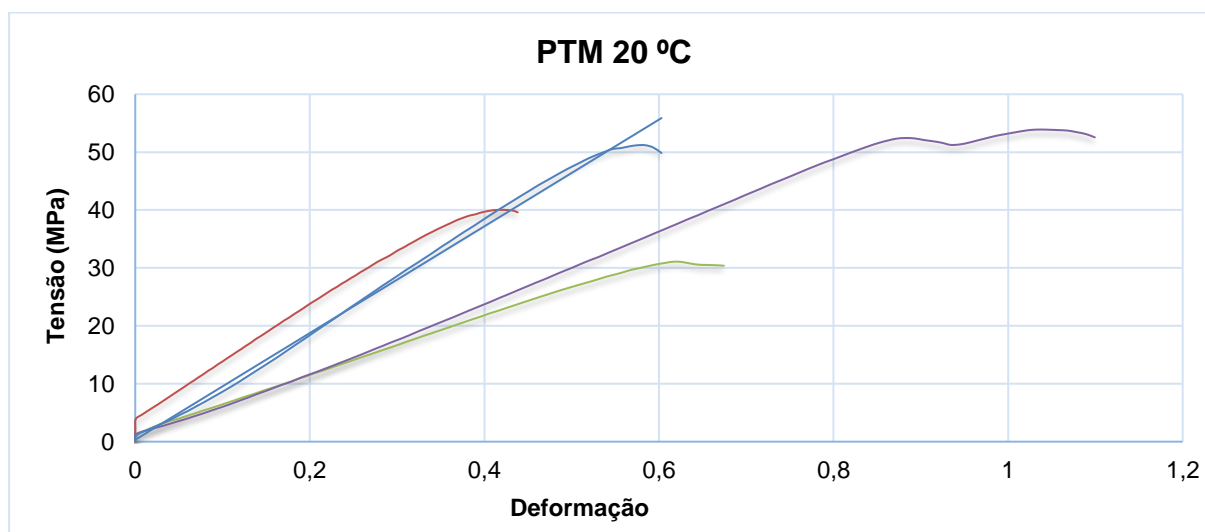


Figura 37 - Gráfico tensão x deformação PTM 20 °C

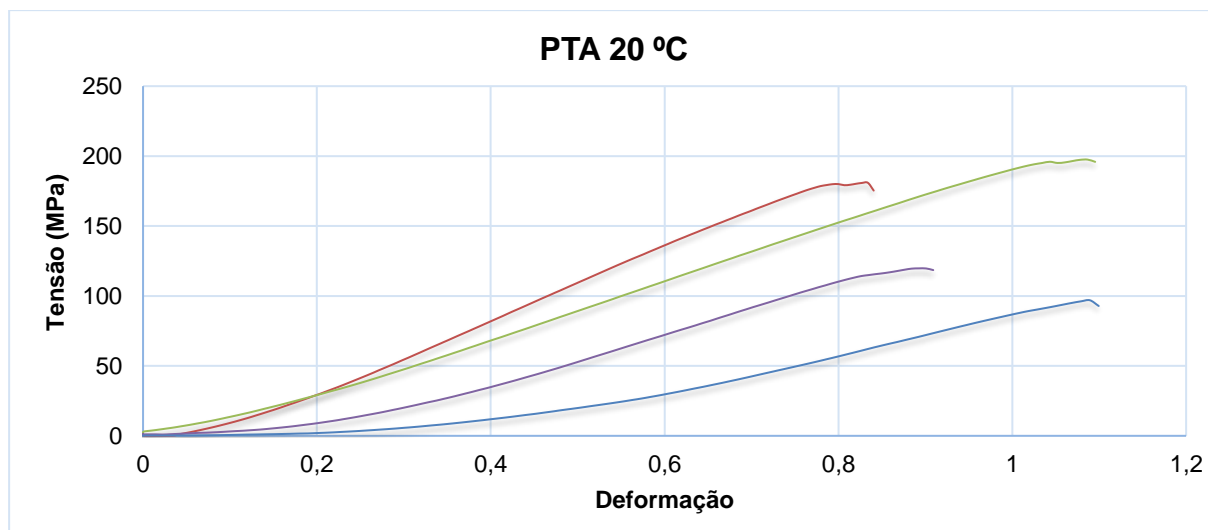


Figura 38 - Gráfico tensão x deformação PTA 20 °C

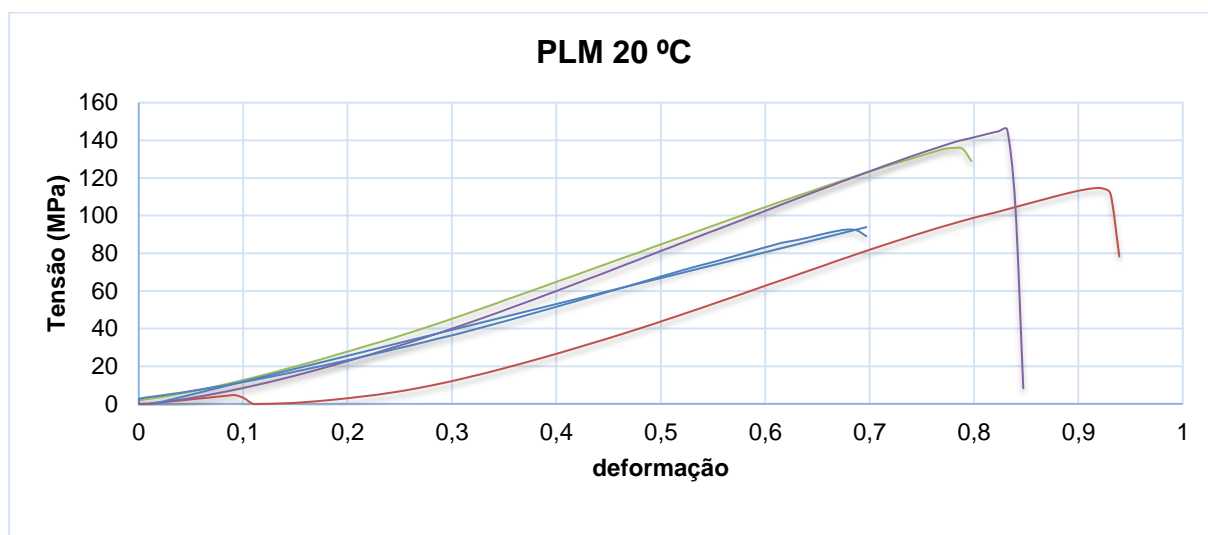


Figura 39 - Gráfico tensão x deformação PLM 20 °C

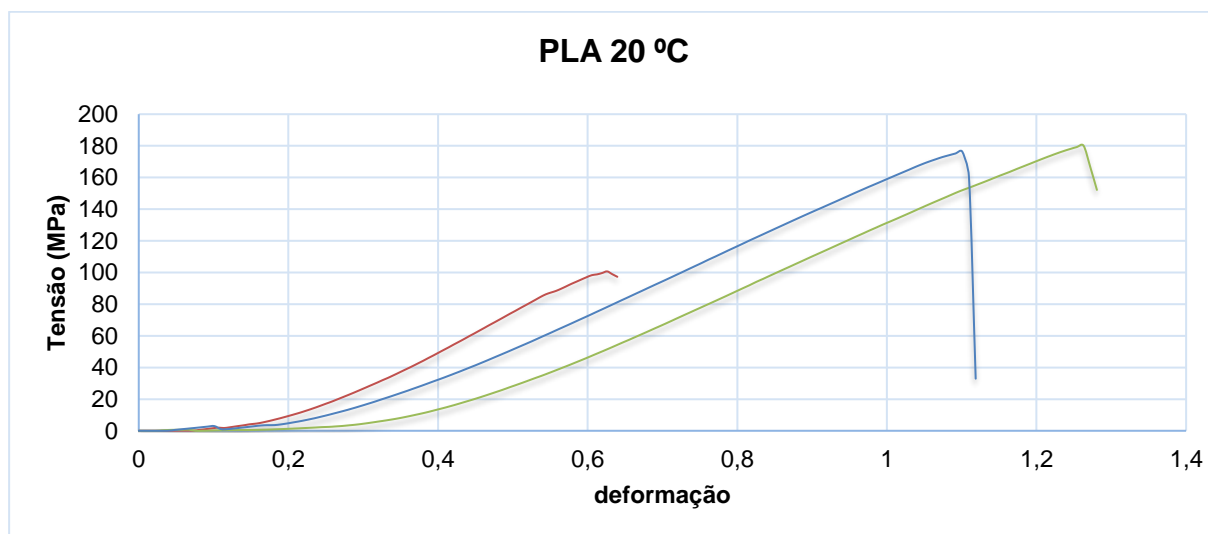


Figura 40 - Gráfico tensão x deformação PLA 20 °C

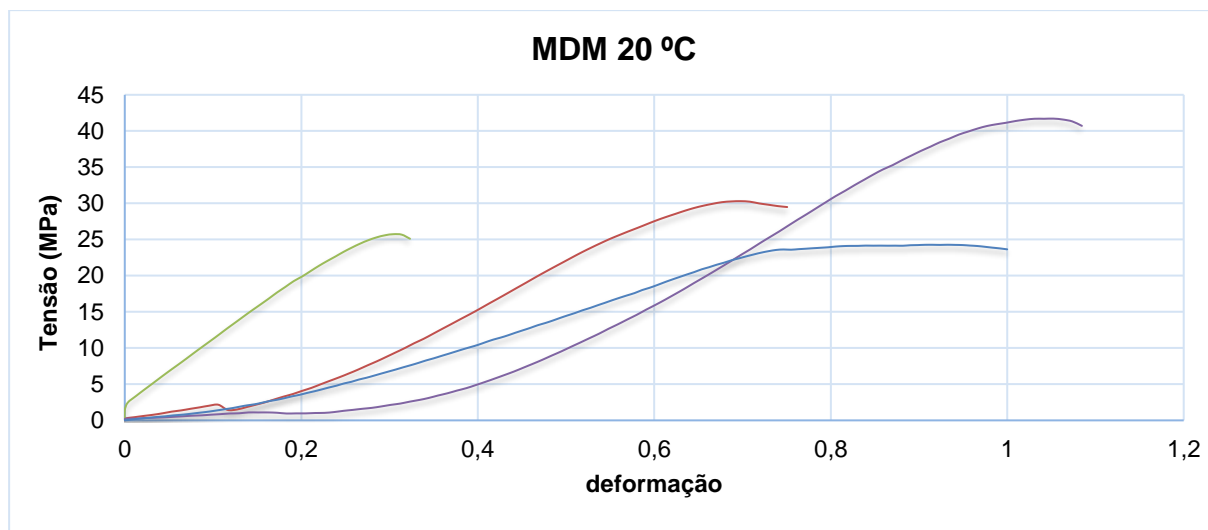


Figura 41 - Gráfico tensão x deformação MDM 20 °C

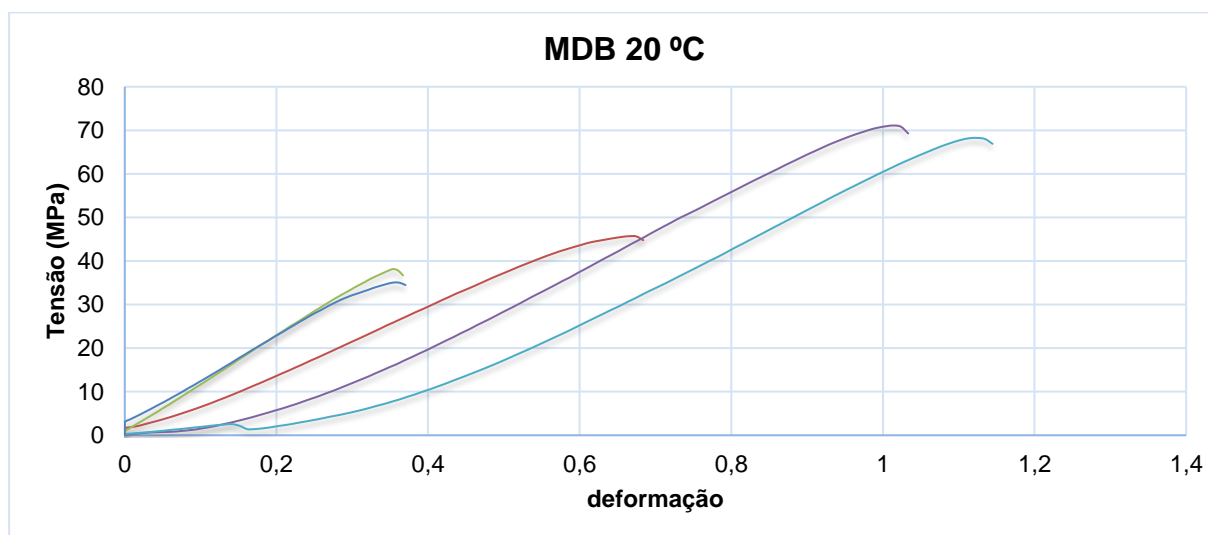


Figura 42 - Gráfico tensão x deformação MDB 20 °C

As Figuras 43 a 46 apresentam os blocos expostos a temperaturas de 400 °C, e resfriadas de forma gradual (designado no gráfico pela letra G).

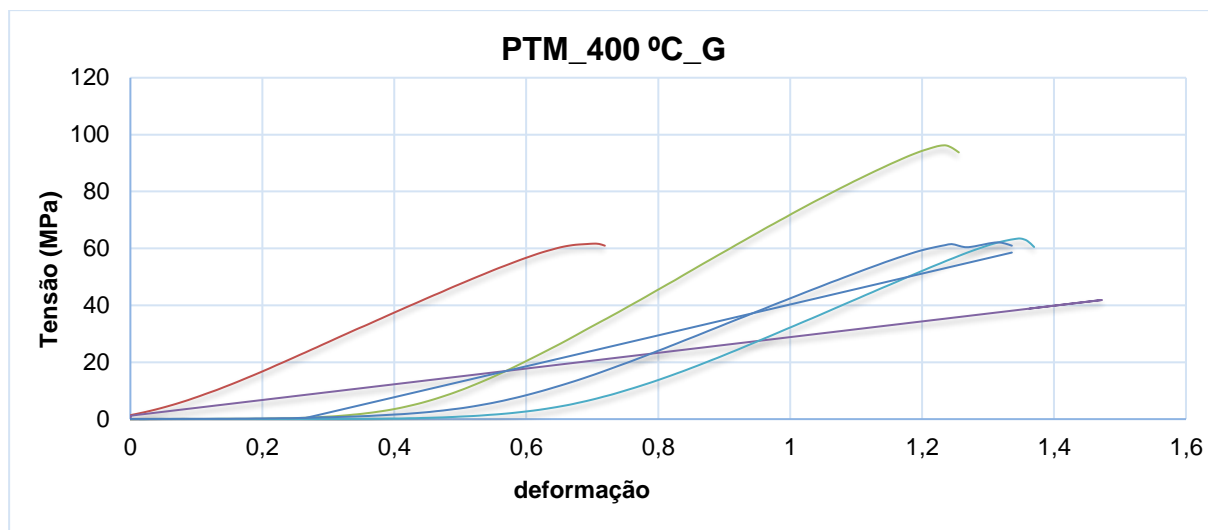


Figura 43 - Gráfico tensão x deformação PTM 400 °C arrefecimento gradual

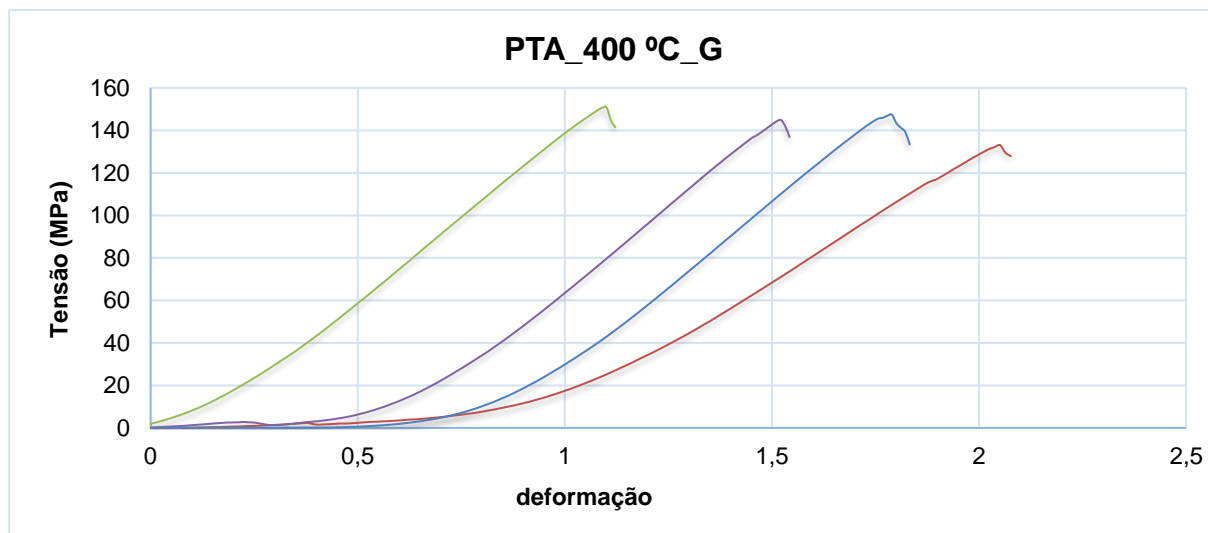


Figura 44 - Gráfico tensão x deformação PTA 400 °C arrefecimento gradual

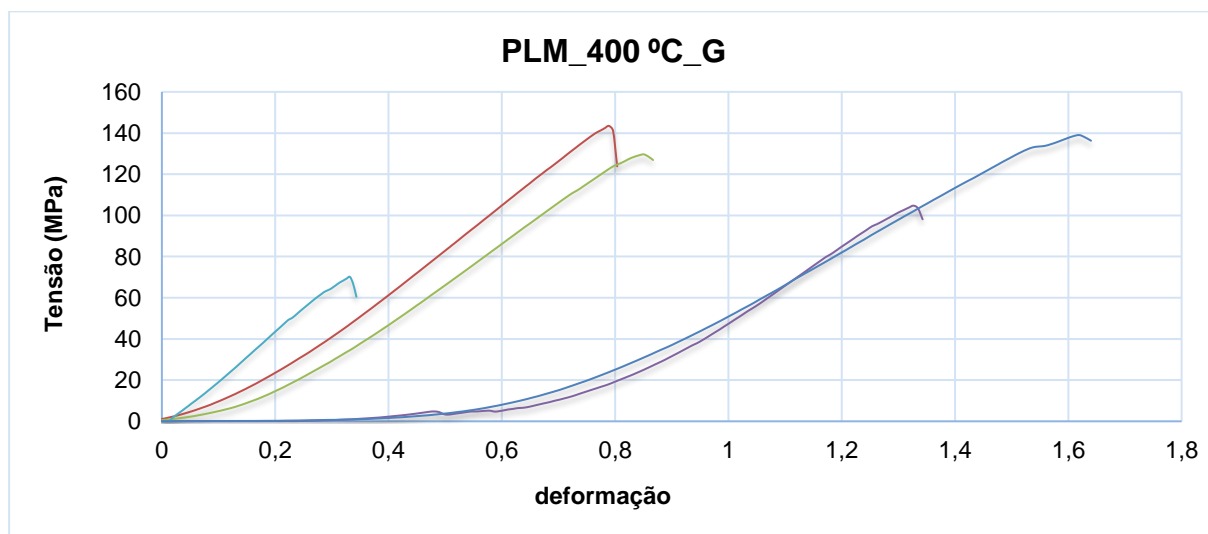


Figura 45 - Gráfico tensão x deformação PLM 400 °C arrefecimento gradual

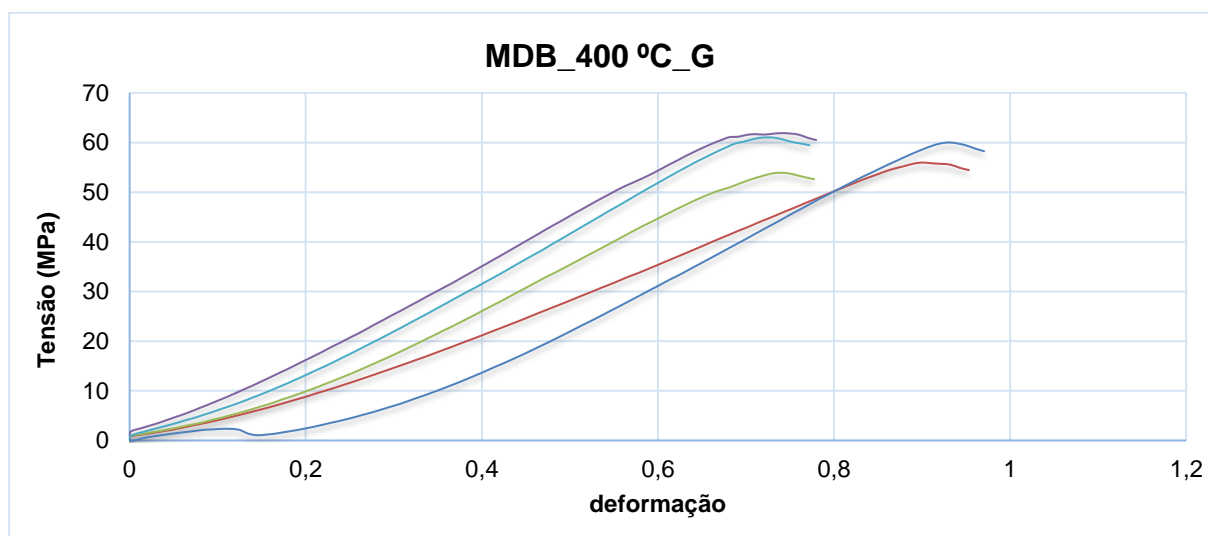


Figura 46 - Gráfico tensão x deformação MDB 400 °C gradual

As Figuras 47 e 48 apresentam os blocos expostos a temperaturas de 400 C, e resfriadas de forma brusca (representado no gráfico pela letra B).

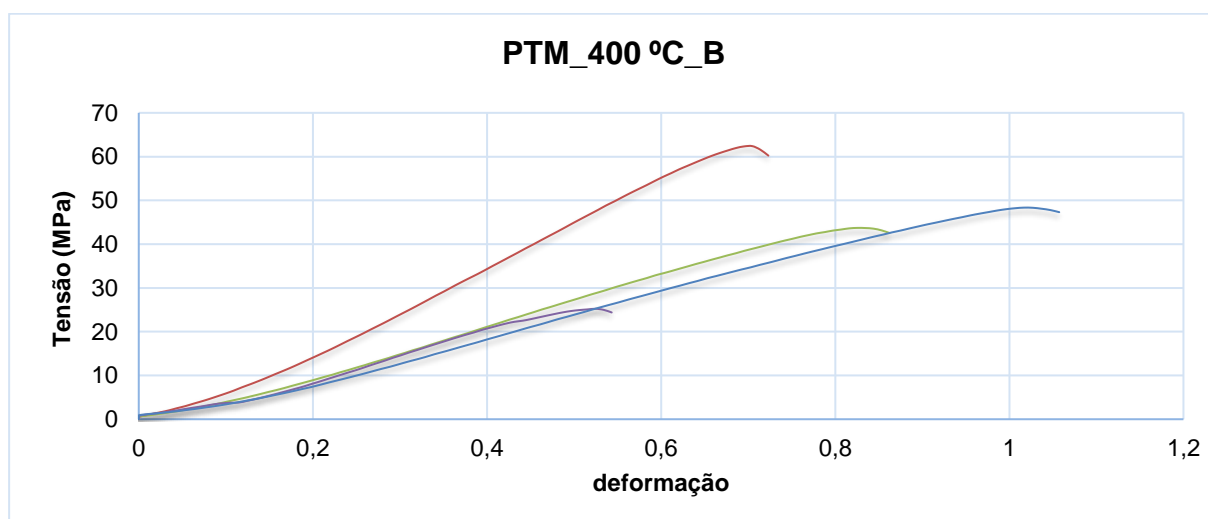


Figura 47 - Gráfico tensão x deformação PTM 400°C brusco

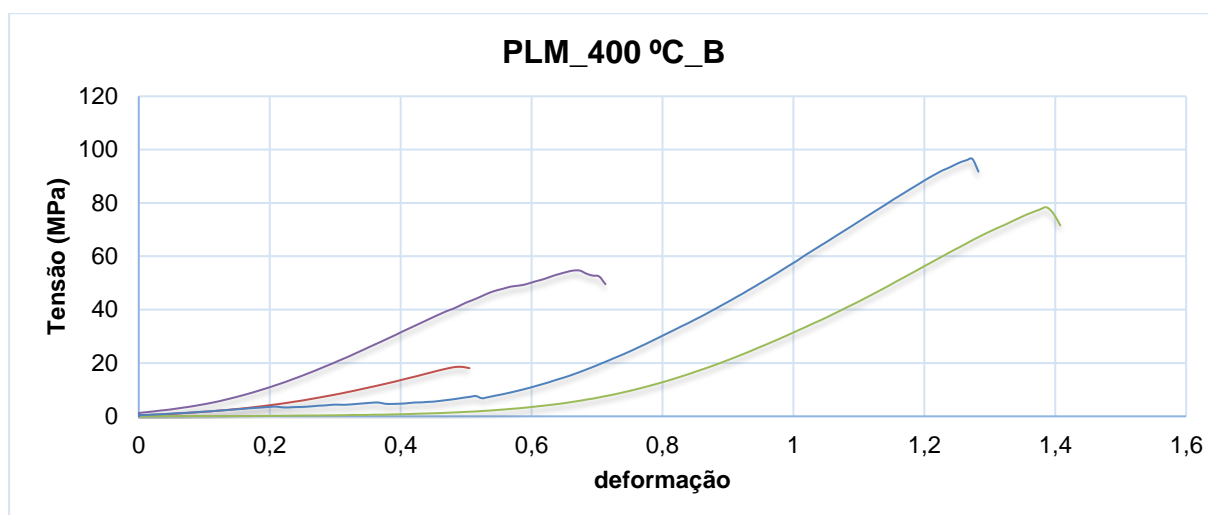


Figura 48 - Gráfico tensão x deformação PLM 400 °C brusco

As Figuras 49 a 51 apresentam os blocos expostos a temperaturas de 800 °C, e resfriadas de forma brusca.

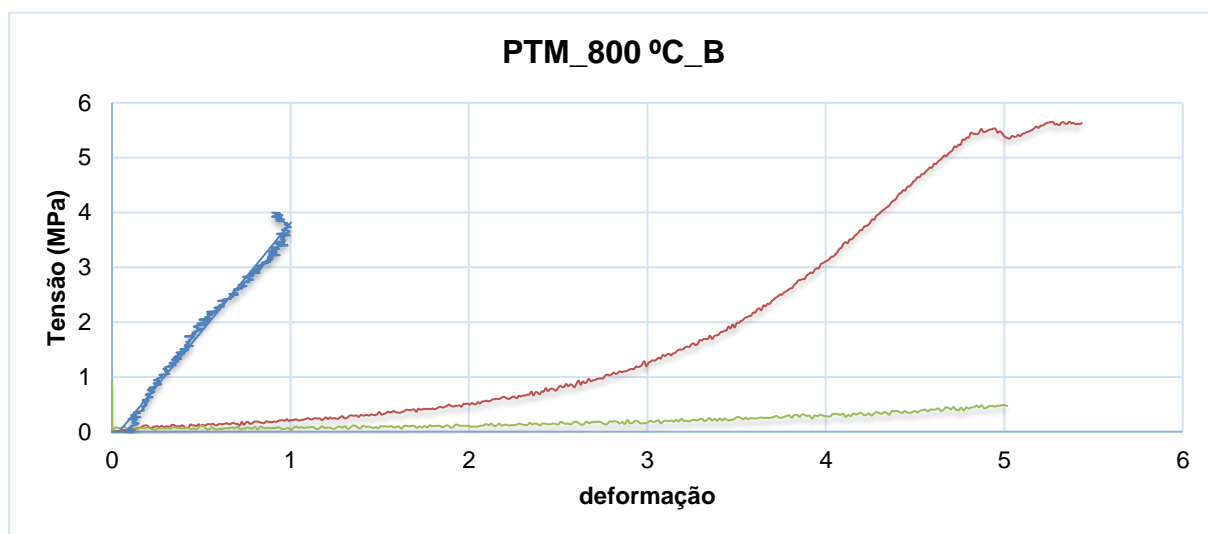


Figura 49 -Gráfico tensão x deformação PTM 800°C brusco

A Figura 49 apresenta resultados visuais muito variáveis nos ensaios dos blocos, entretanto, os granitos PTM expostos a 800 °C apresentaram uma fissuração elevada e baixos valores de tensão de ruptura. Com isso, embora visualmente os gráficos aparentem resultados muito diferentes, ao se analisar os valores percebe-se que a variação não é alta, uma vez que quando comparados a tensão de controle (44,05 Mpa), os valores são extremamente baixos.

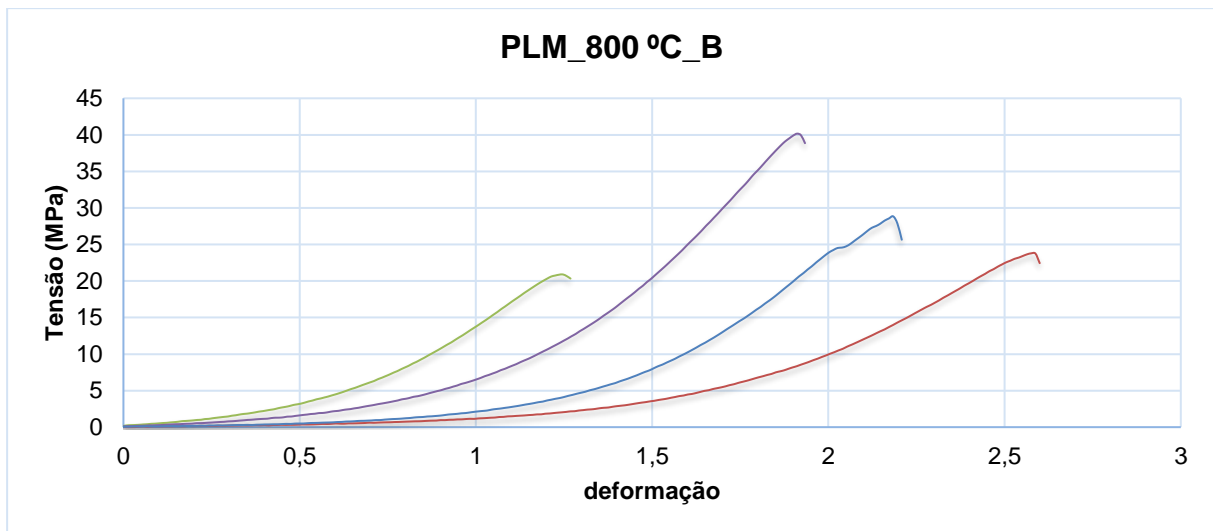


Figura 50 - Gráfico tensão x deformação PLM 800°C brusco

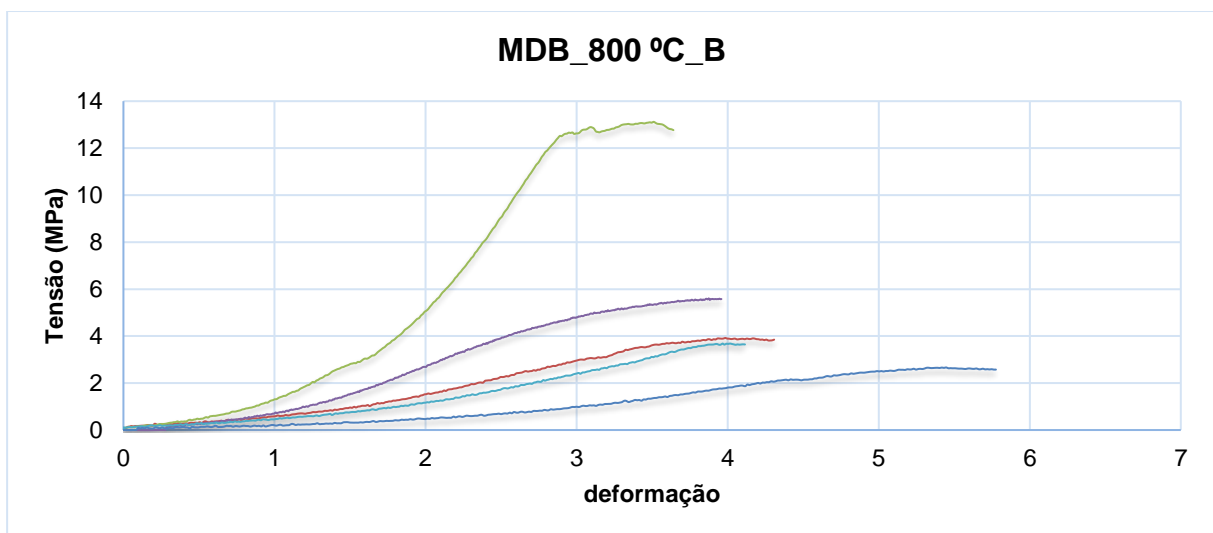


Figura 51 - Gráfico tensão x deformação MDB 800 °C brusco

As Figuras 52 a 55 apresentam os blocos expostos a temperaturas de 800 °C, e resfriadas de forma gradual.

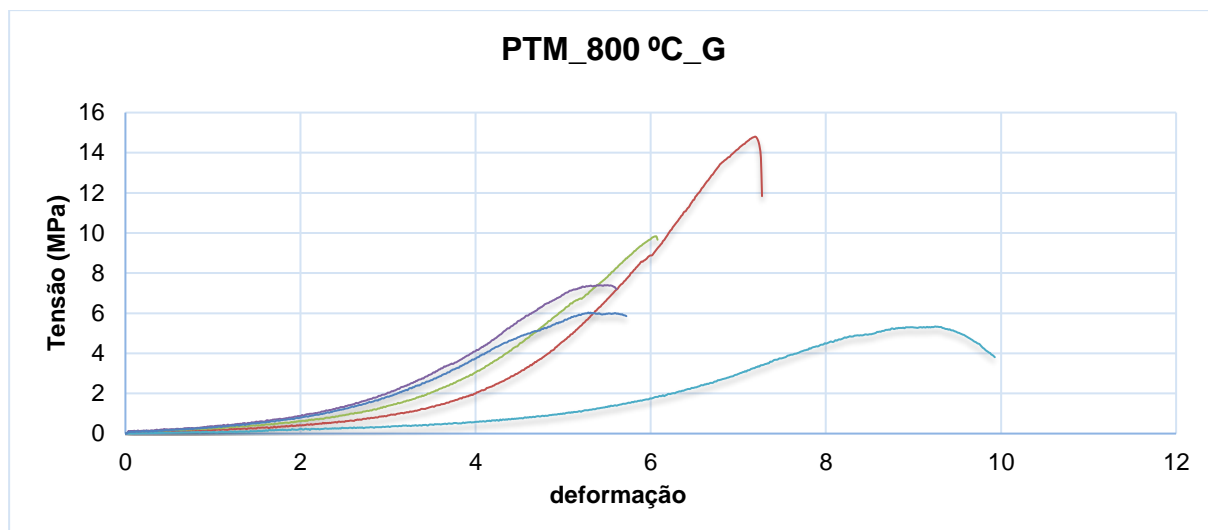


Figura 52 - Gráfico tensão x deformação PTM, 800 °C normal

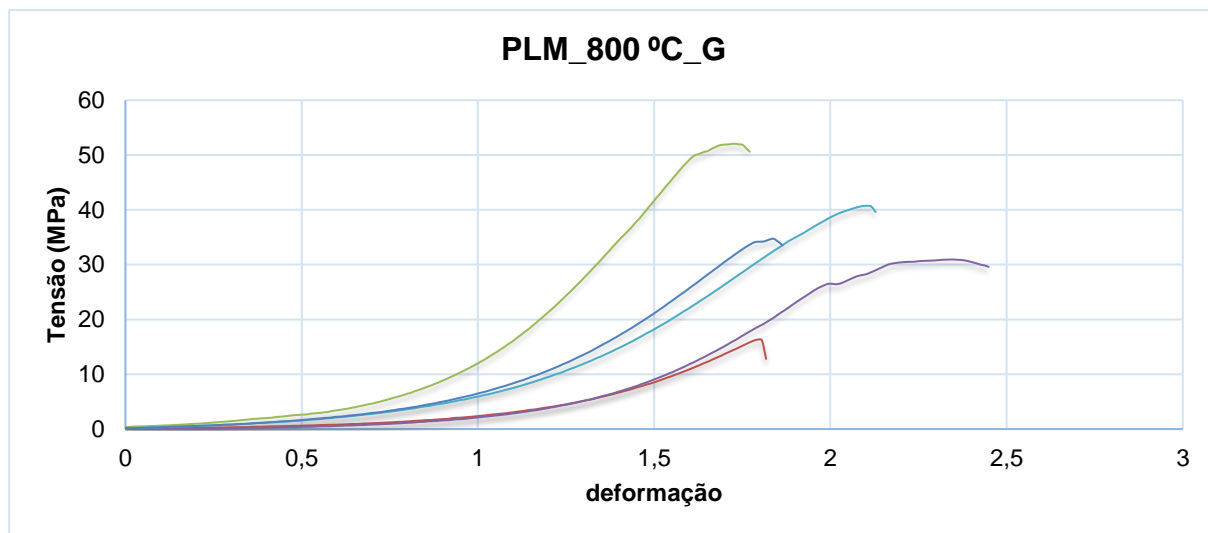


Figura 53 - Gráfico tensão x deformação PLM 800 °C normal

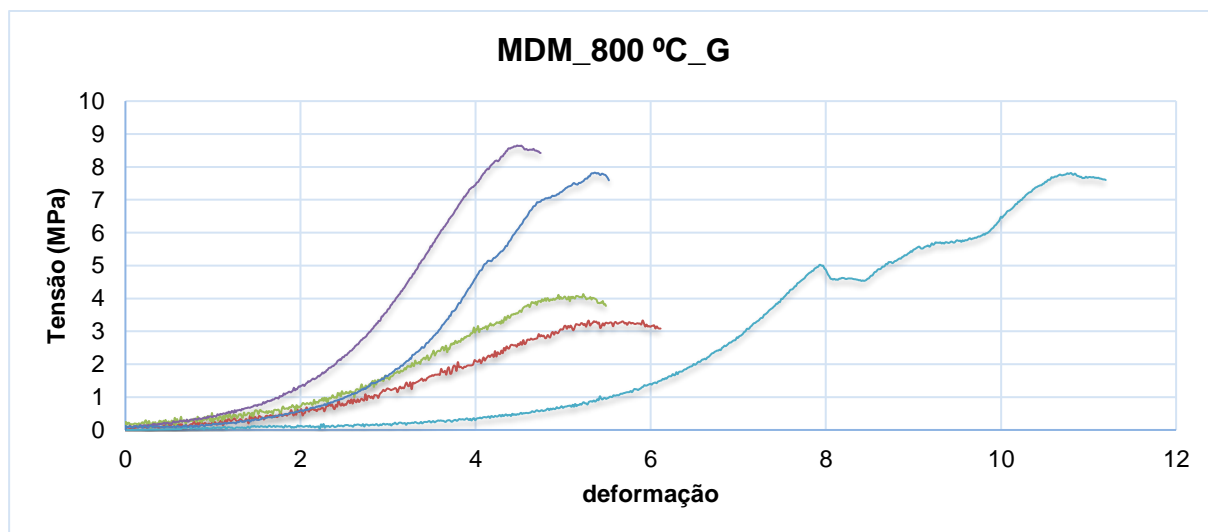


Figura 54 - Gráfico tensão x deformação MDM 800 °C normal

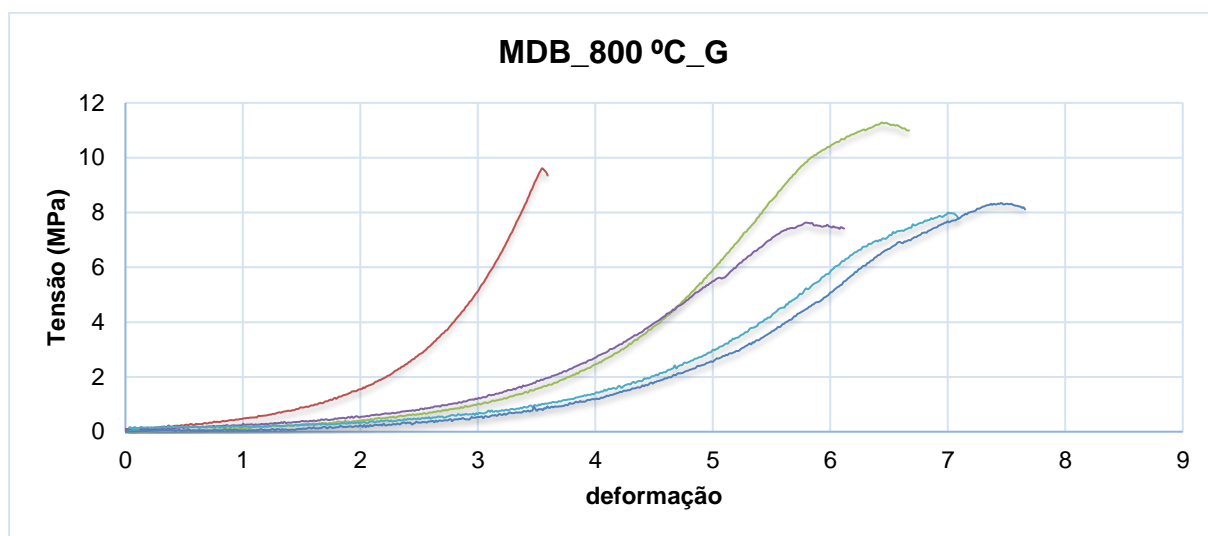


Figura 55 - Gráfico tensão x deformação MDB 800 °C normal

O granito do tipo PTA exposto a temperatura de 800 °C apresentou dano considerável após resfriamento e não foi possível efetuar os ensaios de compressão. Todos os granitos ensaiados a 400 °C não apresentaram nenhuma fendilhação aparente que indique comprometimento estrutural. Ao comparar o resultado de todos os ensaios realizados, é possível obter uma relação entre as porosidades abertas, os coeficientes de absorção de água, o módulo de deformação e a tensão máxima de ruptura à compressão. A Tabela 30 apresenta os valores médios de resistência a compressão por patamar de temperatura.

Tabela 30 - Valores médios de resistência a compressão

Tensão de Rompimento MPa	20 °C	400 °C normal	400 °C brusco	800 °C normal	800 °C brusco
PTA	148,77	144,02	-	-	desfez
PTM	44,05	65,06	44,92	8,68	1,90
MDB	51,66	58,57	-	8,97	5,80
MDM	30,50	-	-	6,35	-
PLM	122,16	112,00	62,02	34,96	28,43
PLA	152,35	-	-	35,87	-

Como apresentado anteriormente, verificou-se que a porosidade aberta está diretamente ligada à absorção de água: quanto maior a porosidade, mais água o corpo de prova absorve. Porém, a relação é inversa quando se compara a porosidade com o módulo de deformação e a tensão de ruptura. Quanto maior a porosidade, menor o módulo de deformação e a tensão de ruptura, como apresentado na Figura 56.

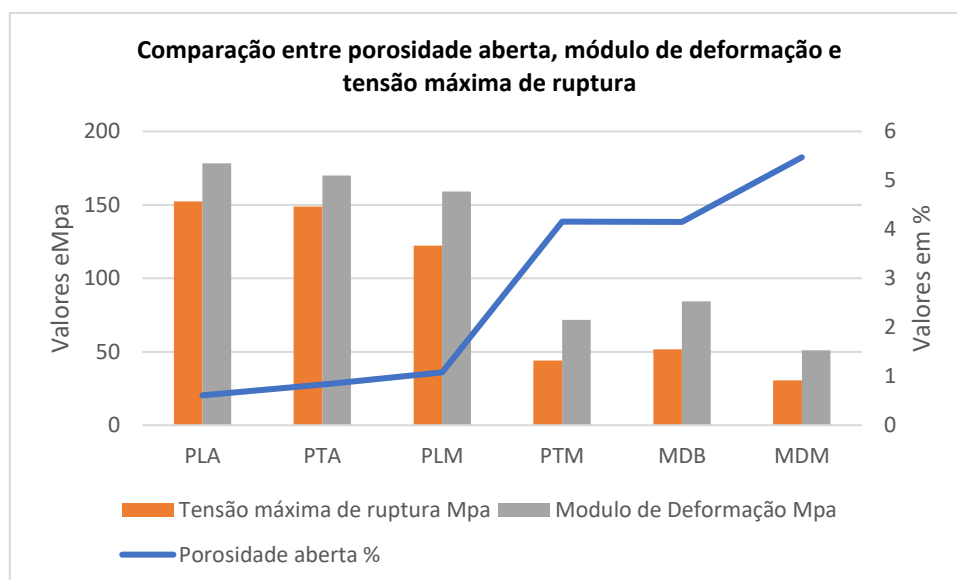
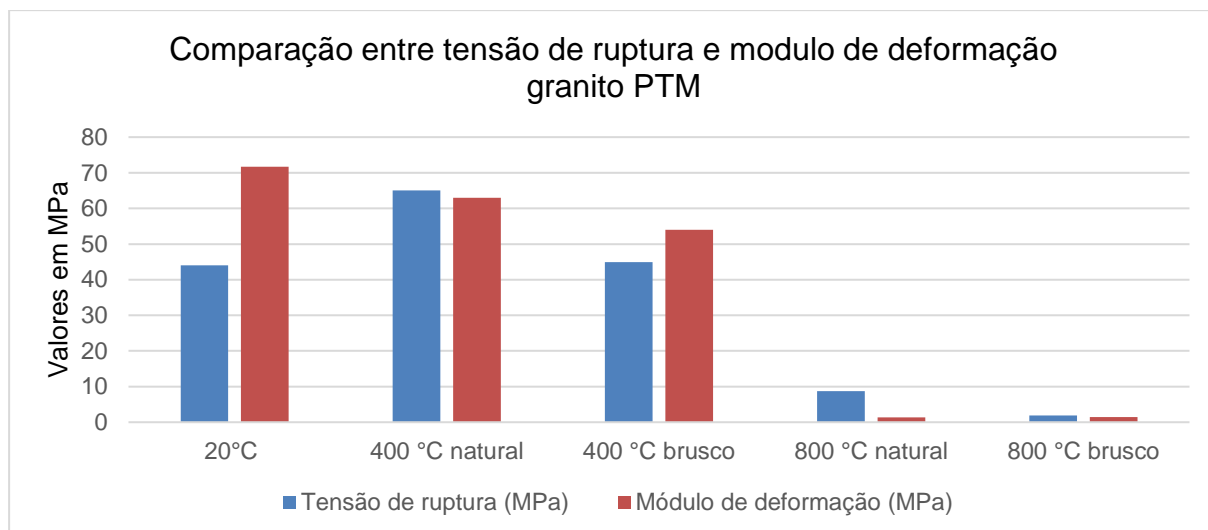


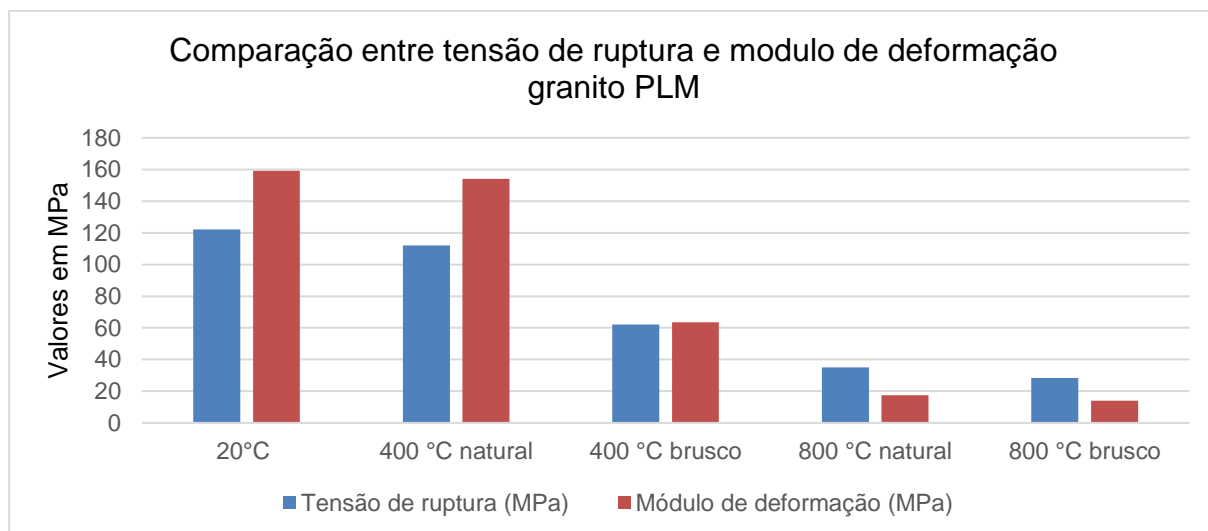
Figura 56 - Comparação entre porosidade aberta, módulo de deformação e tensão máxima de ruptura

O módulo de deformação foi calculado pela equação do gráfico tensão x deformação pelo programa Excel, analisando os pontos do gráfico onde o bloco se encontra em regime elástico. O principal motivo de terem sido utilizados dois tipos de modo de arrefecimento foi avaliar o impacto do choque térmico na resistência à compressão do granito. Verificou-se que, ao tomar como referência o granito PTM, ao ser exposto a 400 °C e resfriado de forma natural, o granito apresentou um aumento na resistência à compressão. Entretanto, ao ser exposto à mesma temperatura, porém com arrefecimento brusco, a tensão de ruptura quase não apresentou alteração em relação ao valor de referência. Ao tratar-se de temperaturas mais altas, o impacto na resistência é muito maior. O granito PTM exposto à 800 °C com resfriamento brusco teve resistência à compressão praticamente nula. A comparação entre tensão de ruptura e módulo de deformação dos granitos para diferentes temperaturas é apresentada nas Figuras 57 a 62.



**Valores médios*

Figura 57 - Comparação entre temperaturas e modo resfriamento granito PTM



**Valores médios*

Figura 58 - Comparação entre temperaturas e modo resfriamento granito PLM

No granito PLM, o impacto da exposição a altas temperaturas e ao choque térmico é ainda maior. Enquanto no resfriamento natural a 400 °C resulta na redução ligeira da resistência à compressão e relação aos valores de referência, o arrefecimento brusco conduz a uma redução de mais de 50% da tensão de rotura, conforme mostra a Figura 58.

É importante ressaltar que em todos os granitos expostos a qualquer aumento de temperatura, houve uma redução do módulo de deformação, sendo mais visível em

temperaturas mais altas. Além disso, todos os blocos expostos a 800 °C sofreram uma redução considerável em sua resistência à compressão e módulo de deformação. Esta redução deve estar relacionada com visíveis a mudanças de aspecto físico dos corpos de prova depois da exposição a altas temperaturas e arrefecimento. Foram observados fissuras, esfarelamento e até a desintegração completa do bloco (Figuras 59 a 61), como no caso dos granitos PTM exposto a 800 °C e arrefecimento brusco e PTA, expostos a 800 °C e resfriamento normal. A Tabela 31 apresenta o impacto causado pela exposição a 800 °C em cada granito.

Tabela 31 - Impactos da temperatura na estrutura dos granitos

Bloco	Exposição a 800 °C
PLA	Baixa fissuração
PTA	Destruição total
PLM	Baixa fissuração
PTM	Fissuração elevada
MDB	Fissuração intermediária
MDM	Fissuração elevada



Figura 59 - Granitos PTA e MDB após exposição a 800 °C e resfriamento natural



Figura 60 - Granitos MDM e PTM (direita) após exposição a 800 °C



Figura 61 - Granitos PLM e PLA após exposição a 800 °C e resfriamento natural

As Figuras 62 a 65 apresentam uma comparação entre a tensão de ruptura e o módulo de deformação dos granitos.

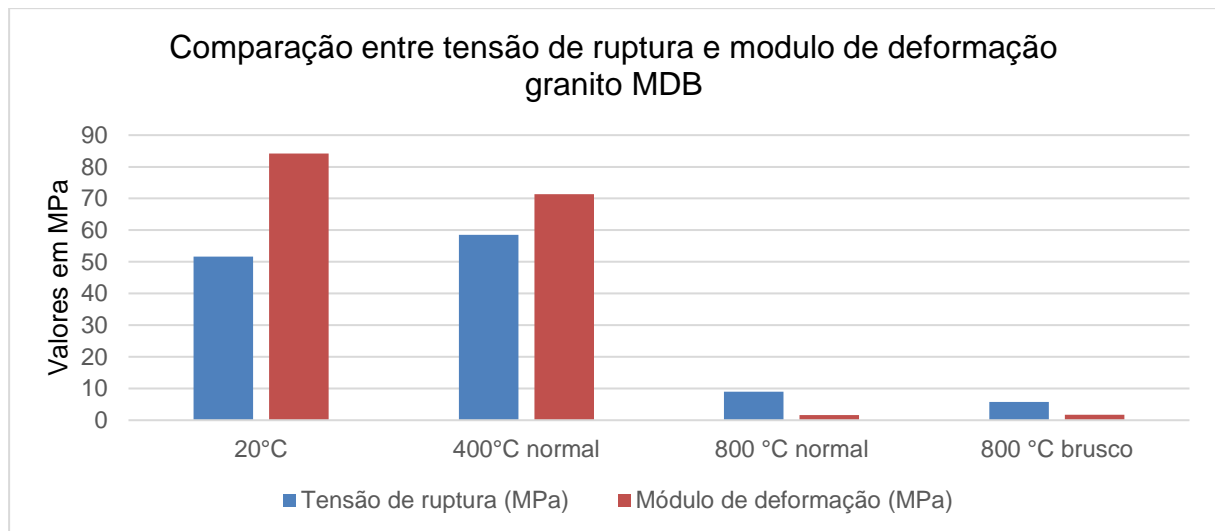


Figura 62 - Comparação entre temperaturas e modo resfriamento granito MDB

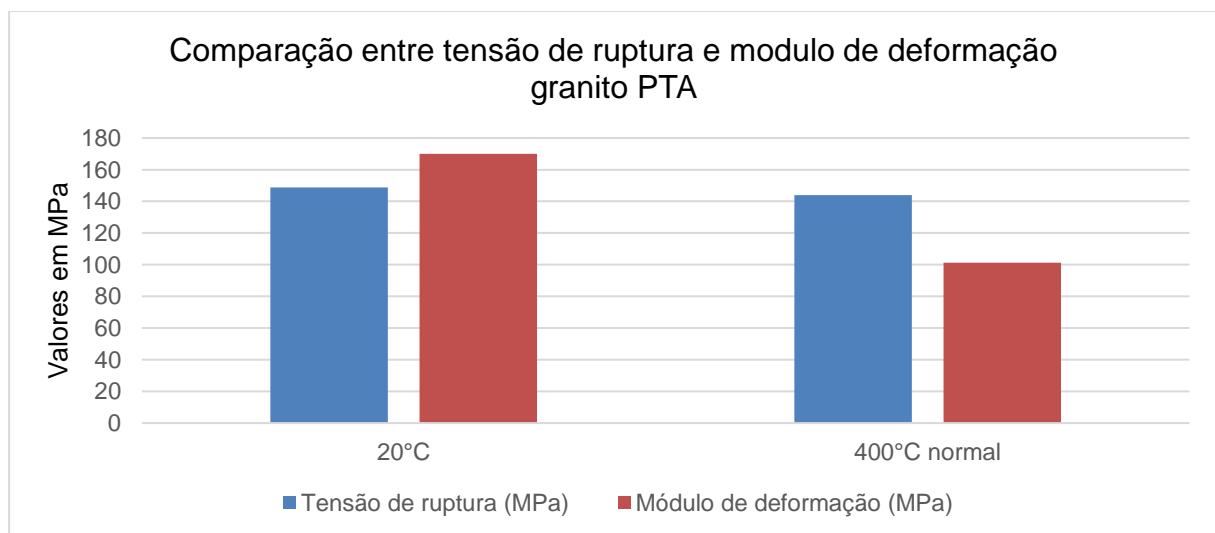


Figura 63 - Comparação entre temperaturas e modo resfriamento granito PTA

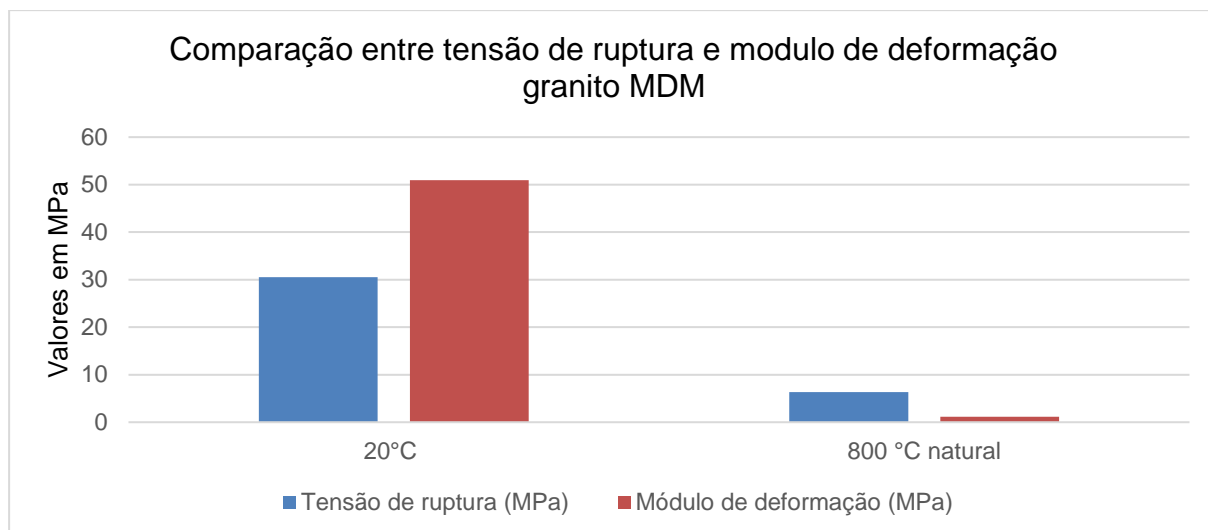


Figura 64 - Comparação entre temperaturas e modo resfriamento granito MDM

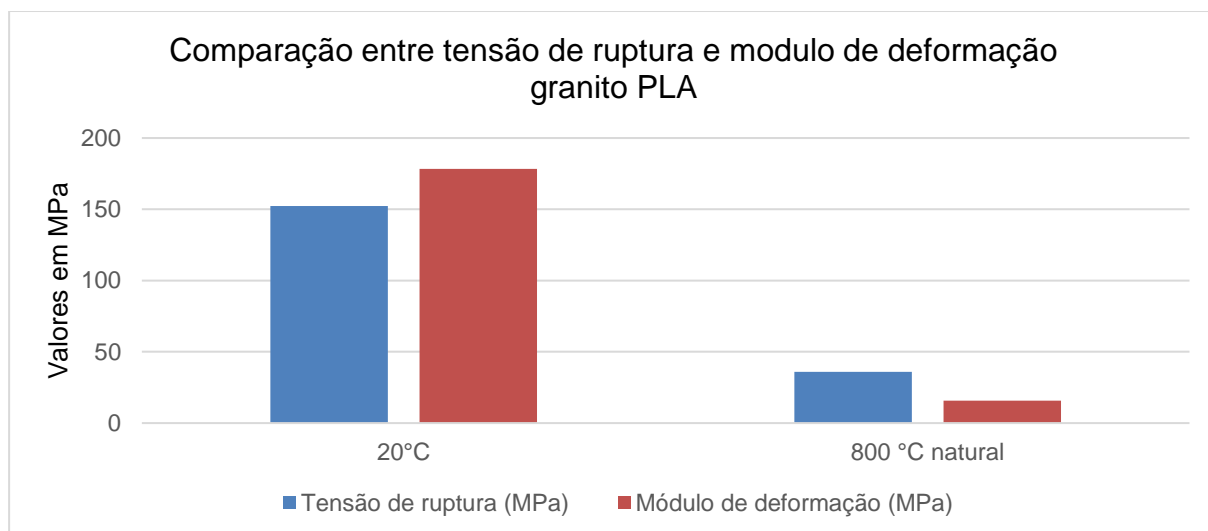


Figura 65 - Comparação entre temperaturas e modo resfriamento granito PLA

Foi possível observar leves mudanças na coloração de alguns blocos, os granitos PTM e MDM, saíram de uma coloração amarelada para um tom avermelhado/rosado como mostra a Figura 66. Com isso, apenas dois dos seis granitos estudados obtiveram uma mudança de cor para os patamares de temperatura estudados, não sendo possível gerar uma padronização para os blocos estudados.



Figura 66 - Blocos antes e depois de aquecimento a 800 °C

5. Considerações finais

Após a realização dos ensaios de caracterização física e mecânica dos blocos de granito Póvoa de Lanhoso (PLA azul e PLM amarelo), granito de Ponte de Lima (PTA azul e PTM amarelo) e granito de Mondim de Basto (MDB branco e MDM amarelo), foi possível concluir que existe uma relação entre a porosidade aberta e os coeficientes de absorção de água por capilaridade e por imersão: quanto maior a porosidade do granito, maior a sua capacidade de absorver água. Também, foi possível constatar que os granitos que apresentaram as maiores porosidades e coeficientes de absorção obtiveram os valores mais baixos de resistência à compressão.

Como apontado em resultados apresentados na bibliografia, onde se constatou a importância da composição da rocha no impacto gerado pelo fogo, foi possível observar que para o mesmo tipo de ensaio, mantendo-se a temperatura, a curva de aquecimento e modo de resfriamento, diferentes granitos obtiveram diferentes resultados. Como foram considerados granitos de diferentes regiões de Portugal e com resultados variáveis, é reforçado o impacto que diferentes tipos de granito têm nas construções, conforme apresentado no estado da arte (Capítulo 2).

Outro aspecto de alta relevância foi o impacto da temperatura no módulo de deformação do granito, uma vez que 100% dos granitos expostos a algum aumento de temperatura apresentaram redução no módulo de deformação, independente do modo de resfriamento.

Os diferentes modos de resfriamento mostraram a importância de se estudar os incêndios em construções feitas de alvenaria de pedra, uma vez que o modo como o granito é resfriado pode ser extremamente prejudicial para o comportamento da pedra e na sua resistência residual. Considera-se que é necessário um maior cuidado ao combater um incêndio em uma construção histórica, visto que se pode prejudicar a estrutura pela falta de informação técnica.

5.1. Trabalhos futuros

Foi constatada a importância de se caracterizar ao máximo possível o tipo do granito estudado, uma vez que existem correlações diretas entre as propriedades físicas e mecânicas. Sugere-se que para trabalhos futuros, seja levado em consideração:

- diferentes tipos de resfriamentos, como extintores de incêndios comuns e produtos químicos, de modo verificar seu impacto na estrutura do granito;
- o ensaio conjunto entre granito e argamassa, uma vez que grande parte das construções de alvenaria de pedra apresentam algum tipo de ligante;
- ensaios para determinar a resistência à tração direta e à tração na flexão do granito;
- ensaios em paredes compostas de blocos de granito, de modo a avaliar o impacto do fogo no conjunto.

6. Referências bibliográficas

Alvenaria de Pedra Seca. Disponível em: <<http://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-alvenaria-de-pedra-seca.html>>.

BALTAZAR, C. **arenitos brandos utilizados em.**

BIRÓ, A.; HLAVIČKA, V.; LUBLÓY, É. Effect of fire-related temperatures on natural stones. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 92–101, 2019.

BOŠNJAK, J. et al. Experimental and numerical studies on masonry after exposure to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 230, 2020.

CHAKRABARTI, B.; YATES, T.; LEWRY, A. Effect of fire damage on natural stonework in buildings. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 7, p. 539–544, 1996.

chibote. Disponível em: <https://www.tripadvisor.pt/Attraction_Review-g4191038-d8634095-Reviews-Sentier_des_Chibottes-Vals_pres_le_Puy_Haute_Loire_Auvergne_Rhone_Alpes.html>.

CÜLFIK, M. S. OF ELEVATED TEMPERATURES ON THE RESIDUAL MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-PERFORMANCE MORTAR; ÖZTURAN, T. Effect of elevated temperatures on the residual mechanical properties of high-performance mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 5, p. 809–816, 2002.

DE FRANÇA, L. A. A. Análise da durabilidade da reação ao fogo da madeira e painéis derivados de madeira. p. 132, 2019.

DELHOMME, F.; AMBROISE, J.; LIMAM, A. Effects of high temperatures on mortar specimens containing Portland cement and GGBFS. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 45, n. 11, p. 1685–1692, 2012.

EUROCODE 6: DESIGN OF MASONRY STRUCTURES. **Eurocode 6: Design of masonry structures**, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 1745 Masonry and masonry products – Methods for determining thermal properties. 2012.

FEIGLSTORFER, H.; GRUBER, M.; SCHROEDER, H. earth construction & tradition List of authors. v. 1, 2016.

FLORES, B. et al. Fundamentos de combate a incêndio. p. 1–150, 2016.

GENTILE, P. et al. p. 6–8, 2015.

GOYENA, R.; FALLIS, A. . **Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria**. [s.l: s.n.]. v. 53

GUEDES, J. M.; COSTA, A. a Alvenaria De Pedra E As Suas Particularidades Como Material. **Sísmica 2010 8º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica**, n. March 2017, p. 1–13, 2010.

ICNF. Análise Das Causas Dos Incêndios Florestais - 2003 - 2013. **Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas**, p. 31, 2014.

LOURENÇO, L. **Incendios em estruturas. Aprender com o passado**. v. 110

Machu Picchu. Disponível em: <<https://www.minutoseguros.com.br/blog/machu-picchu-e-suas-belezas-historicas/>>. Acesso em: 22 mar. 2019.

MEL, A. R. Sobre perfis I de aço em situação de incêndio paramétrico. 2016.

PINHO, F. F. D. S. Faculdade de Ciências e Tecnologia Estudo experimental com modelos simples e reforçados. 2007.

REIS, A. S. Determinação de cenários de incêndio em edifícios. 2011.

RIBEIRO, C. M. M. Avaliação do Desempenho de Revestimentos Superficiais na Durabilidade de Pedra de Construção. 2013.

ROSA, C. F. M. F. F. DA. Caracterização de alvenarias de pedra antigas. p. 114, 2013.

RUSSO, S.; SCIARRETTA, F. Masonry exposed to high temperatures: Mechanical behaviour and properties - An overview. **Fire Safety Journal**, v. 55, p. 69–86, 2013.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. DE. Calcário e Dolomito. **Rochas e Minerais Industriais - Usos e Especificações**, p. 363–391, 2008.

SANTOS, S. C. DOS; COSTA, S. K. Arquitetura Vernacular Ou Popular Brasileira: Conceitos, Aspectos Construtivos E Identidade Cultural Local. **Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, v. 24, n. 35, p. 218–259, 2017.

SOUSA, P. F. DA S. Caracterização de argamassas de terra e cal para refechamento de juntas de alvenaria de pedra no Vale das Lobas. 2016.

VASCONCELOS, G. Universidade do Minho. **Investigação experimental na mecânica da alvenaria de pedra: Caracterização de granitos e comportamento de paredes antigas de alvenaria de pedra**, n. 5, p. 87–89, 2005.

VAZ, J. G.; CARNEIRO, V. A. Escala De Mohs: O Grau De Dureza Dos Minerais Dos Estojos Didáticos Do Acervo Da Segep- Seção De Geologia E Paleontologia Da Ueg/Ccet. **Escala De Mohs: O Grau De Dureza Dos Minerais Dos Estojos Didáticos Do Acervo Da Segep- Seção De Geologia E Paleontologia Da Ueg/Ccet**, v. 8, n. 2, p. 27–57, 2016.

VEIGA, M. DO R. Argamassas de alvenarias históricas. Funções e características. p. 17–27, 2012.

YANG, J. et al. Mechanical property and thermal damage factor of limestone at high temperature. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 117, n. September 2018, p. 11–19, 2019.